

Vita media dei muoni in alluminio

<i>Corso:</i>	Laboratorio Avanzato - Laurea Magistrale in Fisica
<i>Anno Accademico:</i>	2014/2015
<i>Docente:</i>	Dott.ssa Angela Fava
<i>Assistente di laboratorio:</i>	Giorgio Menon
<i>Gruppo di lavoro:</i>	Francesco Berlato 1093135 francesco.berlato@studenti.unipd.it Giulio Lucchetta 1106625 giulio.lucchetta@studenti.unipd.it Chiara Monni 1108961 chiara.monni@studenti.unipd.it
<i>Data consegna relazione:</i>	24/09/2015

1 Introduzione

1.1 Scopo

Lo scopo dell'esperimento consiste nella stima del tempo di vita medio di muone e antimuone in alluminio, e del rapporto R tra numero di eventi μ^+ e di μ^- . Per effettuare tali misure, si utilizza un apparato costituito da delle barre di scintillatori alternate a lastre di alluminio. Alle estremità degli scintillatori sono collegati dei fotomoltiplicatori (per brevità PMT da ora in avanti), che raccolgono la luce di scintillazione e generano un segnale che viene mandato ai moduli di elettronica, il cui utilizzo verrà spiegato estensivamente in seguito. Tale segnale viene quindi processato e va infine a formare quello che è uno spettro con il numero di eventi (decadimenti) al variare del tempo, sia di muone che antimuone. Successivamente, tramite procedure di fit, si possono stimare i tempi di vita medi e i rapporto R tra μ^+ e μ^- .

1.2 I muoni

Muoni e antimuoni sono leptoni, particelle elementari, dotate rispettivamente di carica -1 e $+1$ (in unità elementari). Hanno una massa di $105.7\text{MeV}/c^2$ e spin $1/2$ e decadono come

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Il tempo di vita medio di μ^- e μ^+ a riposo corrisponde a $\tau = (2.1969811 \pm 0.0000022) \mu\text{s}$ ¹. Nel caso di decadimento dei μ^- in un mezzo materiale, è però possibile che un muone si sostituisca ad un elettrone in un atomo, dando luogo ad un atomo muonico. Questo dà luogo a un sistema metastabile, in cui il muone, per via della differenza di massa, “orbita” ad una distanza (intesa come raggio di Bohr) circa 200 volte minore dal nucleo dell'atomo. Rispetto a un normale atomo con elettroni, ciò causa una sovrapposizione molto maggiore delle funzioni d'onda del nucleo e del muone e provoca una reazione analoga a quella di cattura elettronica, con però il muone al posto dell'elettrone ($\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$, dove p è un protone del nucleo). Un processo del genere implica un tempo di vita medio minore di quello per il decadimento libero, nel nostro caso, per decadimenti in alluminio, si ha $\tau = 0.88 \mu\text{s}$ ². I muoni rivelati dal nostro apparato sono originati dai raggi cosmici incidenti sull'atmosfera terrestre.

¹Dato ricavato dal *Particle Data Group*, 2014

²Capture of Negative Muons by Nuclei, PhysRev.113.679

1.3 Raggi cosmici

Scoperti nel 1912 da Hess, i raggi cosmici sono radiazioni altamente energetiche provenienti dallo spazio. Il loro spettro energetico è estremamente ampio, da circa 10^8 eV arrivando anche fino a energie di 10^{20} eV, anche se a tali estremi il flusso è estremamente basso (Figura 1). L'origine di tale radiazione è di varia natura, può essere generata dal Sole, così come da oggetti galattici o addirittura extragalattici e i processi che portano ad energie così elevate sono tuttora poco chiari. Nella regione del GeV, dove il flusso è più elevato, i raggi cosmici primari, ovvero quelli che incidono direttamente sugli strati più esterni dell'atmosfera terrestre, sono composti per 85% da protoni, 12 % particelle alfa, 1 % nuclei pesanti (numero atomico $Z > 2$) e 2 % elettroni. Sono presenti anche fotoni e neutrini, oltre ad altre particelle in percentuali molto minori (positroni, antiprotoni). Si noti che solo le particelle stabili possono raggiungere la Terra senza prima decadere. La radiazione primaria interagisce con l'atmosfera terrestre, dando luogo a vari processi che comportano l'emissione di particelle secondarie. In particolare, i protoni, tramite interazione forte con i nuclei del gas atmosferico, generano pioni e, con minor frequenza, altri adroni. I pioni carichi successivamente decadono (nel 99.988% dei casi) come

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

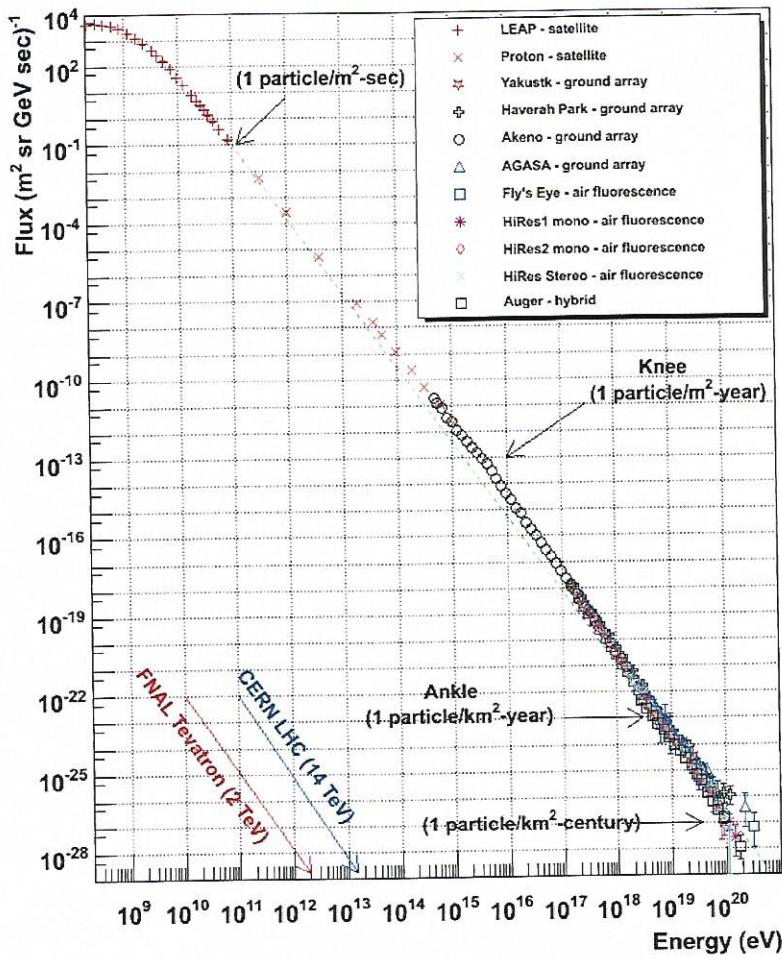


Figura 1: Flusso dei raggi cosmici al variare dell'energia

Tali muoni sono quelli effettivamente rivelati dal nostro apparato; come noto essi, pur avendo un tempo di vita medio di $2.2 \mu s$, raggiungono la superficie terrestre grazie alla dilatazione relativistica dei tempi. Nei raggi cosmici secondari è presente anche una componente elettromagnetica (e^- , e^+ , γ), inizialmente generata dal decadimento del pionne neutro in due fotoni di circa 70 MeV. Tali fotoni innescano poi uno sciame elettromagnetico, che continua a propagarsi finché l'energia

lo permette. Tale componente viene solitamente denominata *molle*, per via del scarso grado di penetrazione di tale radiazione, per bloccarla in modo pressoché totale basta infatti uno spessore di 10-20 cm di piombo. I muoni sono invece un tipo di radiazione altamente penetrante e fanno parte della *componente dura* dei raggi cosmici. Il flusso di muoni al variare dell'angolo azimutale segue approssimativamente una legge del tipo

$$I(\theta) \approx I_0 \cos^2(\theta)$$

con $I_0 \sim 10000 \frac{\text{particelle}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}$ (al livello del mare). Al diminuire della quota varia la composizione della radiazione cosmica: la componente adronica a basse quote è dominata dai neutroni, mentre la componente leptonica è dominata dai muoni, che rappresentano anche il contributo maggiore in termini di flusso totale di particelle al suolo. La distribuzione energetica dei muoni al suolo è compresa tra 1 GeV e 20 GeV .

2 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale per la rivelazione dei muoni viene qui di seguito sinteticamente riassunto. Si hanno, innanzitutto, gli scintillatori, che sono delle barre di materiale plastico in grado di rivelare radiazione ionizzante. Cinque scintillatori sono disposti al centro con asse parallelo al pavimento e altri quattro lateralmente in maniera perpendicolare (si veda Figura 2 e Figura 3); quelli centrali sono inoltre alternati a delle lastre di alluminio. Per quanto riguarda le dimensioni delle componenti, gli scintillatori centrali misurano $(193 \cdot 20 \cdot 3) \text{ cm}$, quelli laterali $(251.5 \cdot 21.5 \cdot 3) \text{ cm}$, mentre le lastre di alluminio invece coprono completamente le barre centrali e sono spesse circa 2 cm .

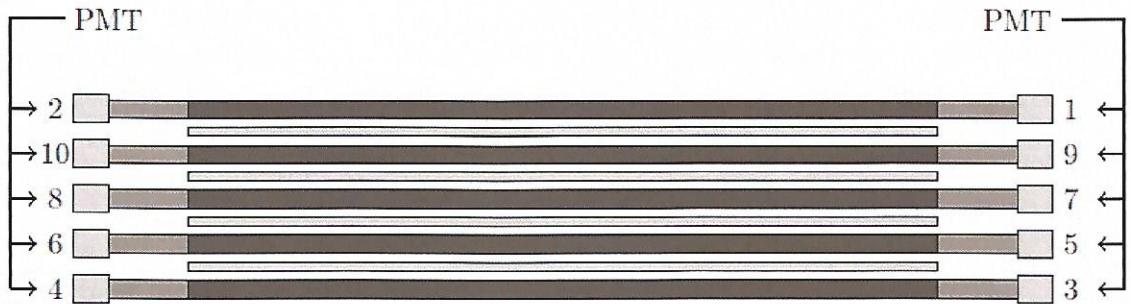


Figura 2: Vista dell'apparato senza gli scintillatori laterali.

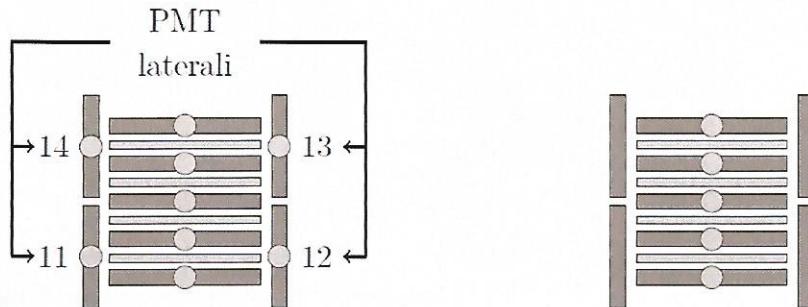


Figura 3: Vista dell'apparato frontale e da dietro con gli scintillatori laterali.

Come visibile dagli schemi, ciascun scintillatore centrale è collegato, attraverso delle guide di luce, a due PMT, uno ad ogni estremità della barra, mentre nel caso delle barre laterali è presente solo un PMT ad una singola estremità. Ad ogni modo, quando la luce di scintillazione viene

prodotta, essa si propaga attraverso lo scintillatore viene raccolta dai fototubi tramite l'utilizzo di dispositivi ottici, le guide di luce, e viene convertita in un segnale elettrico. Quando la luce giunge infatti al PMT, incide su un materiale sensibile (detto *fotocatodo*) e per effetto fotoelettrico causa l'emissione di elettroni; essi vengono a loro volta accelerati e fatti incidere su delle lamine di materiale, dette *dinodi*, in modo da moltiplicare il numero di elettroni del segnale. Alla fine della catena di passaggi, si ha un guadagno del segnale (inteso come rapporto tra il numero di elettroni in uscita dal PMT e quelli liberati dal fotocatodo inizialmente) dato da $G = \delta^N$, dove δ è il numero di elettroni liberati da un dinodo per ogni e^- incidente, mentre N è il numero di dinodi. Tipici guadagni per i fototubi sono dell'ordine di 10^6 .

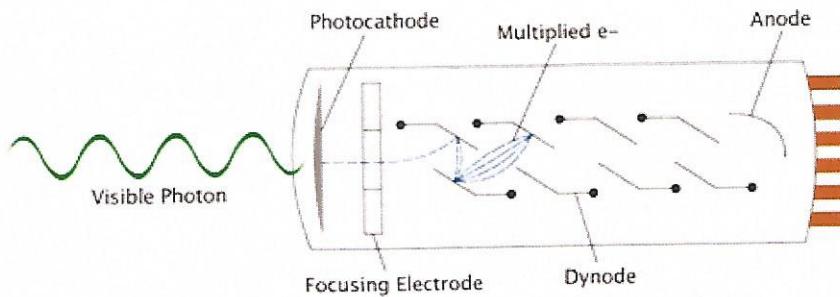


Figura 4: Schematica di un fotomoltiplicatore.

Successivamente, il segnale in uscita dal PMT viene prima di tutto amplificato, poi inviato ad un discriminatore, che, oltre a convertire da segnale analogico a logico, permette di impostare una soglia in modo da eliminare una parte del rumore di fondo. In seguito, dopo aver impostato in modo corretto ritardi e larghezze dei segnali, si possono utilizzare i moduli di coincidenza per creare il *segnale di slab*, cioè quello dato dalla coincidenza di segnale di due PMT sullo stesso scintillatore. Le slab, nel corso della relazione, sono indicate con numeri da 1 a 5, crescenti dall'alto verso il basso dell'apparato. Per motivi di comodità nell'acquisizione delle successive misure, è stata mantenuta per i singoli PMT la stessa numerazione dello scorso anno (Figura 2). Qui di seguito, invece, sono brevemente illustrati i vari moduli di elettronica usati:

- **Discriminatori:** moduli che permettono di convertire un segnale analogico (come quello dei PMT in questo caso) in uno logico di tipo NIM (altezza nominale -800 mV). In pratica, se il segnale in entrata supera una certa soglia regolabile, esso viene accettato e viene emesso un corrispettivo segnale in uscita, di larghezza impostabile entro il range del modulo.
- **Moduli di coincidenza:** dispositivi che ricevono due o più segnali in ingresso e ne emettono uno in uscita, dopo aver eseguito un'operazione logica di and o di or sui segnali. Generalmente possiedono inoltre delle uscite normali e, per il segnale negato, un'uscita barrata e un'uscita di voto.
- **Fan In-Fan Out (or logic):** modulo utilizzato per replicare un segnale in ingresso in più segnali identici in uscita; può inoltre essere usato per costruire delle logiche di or.
- **Moduli di ritardo:** permettono di ritardare un segnale, selezionando dei valori di ritardo discreti e sommabili di $0.5, 1, 2, 4, 8, 16$ e 32 ns , potendo così ottenere un massimo di 63.5 ns .
- **Contatori:** dispositivi che permettono di verificare quante volte dei determinati segnali in ingresso appaiono. Possono contare fino a sei cifre, con un tempo impostabile fino a 999 s oppure in modalità libera (*free run*).
- **THPC:** modulo che genera in uscita un segnale in tensione proporzionale alla differenza temporale fra due segnali (detti di *start* e *stop*). Il segnale di start avvia una rampa di tensione, che continua a crescere in maniera lineare nel tempo fino all'arrivo dello stop. Nel caso il THPC arrivi alla tensione massima per la rampa prima dell'arrivo dello stop, lo strumento si resetta.

- **ADC:** convertitore che permette di passare da segnale analogico del THPC a digitale (che viene usato per creare lo spettro sul computer). Dotato di 4096 canali, accetta tensioni tra 0 e 5 V.

Per l'alimentazione dei fotomoltiplicatori si sono utilizzati tre generatori di tensione. Infine, per alcune misure si è utilizzato un generatore di funzioni.

3 Caratterizzazione dei fotomoltiplicatori.

3.1 Prove di luce e buio

Prima di procedere con la calibrazione vera e propria dell'apparato, è necessario verificare che esso sia il più possibile isolato dalla luce. Gli scintillatori sono infatti molto sensibili e, per minimizzare il rumore generato dalla luce stessa, le parti sensibili dell'apparato sono rivestite con nastro isolante nero. Per verificare che tale isolamento sia effettivamente buono, si è proceduto ad effettuare due tipi di prove di conteggio: una in presenza di luce e una al buio. In entrambi i casi si è misurato il numero di eventi su ciascun PMT e su ciascuna slab per 400 s. Nelle prove al buio, oltre a togliere l'illuminazione dalla stanza, si è aggiunto un ulteriore isolamento all'apparato, che è stato coperto con dei teli neri. Come errore per le singole frequenze, si è semplicemente usato l'errore poissoniano sul numero di eventi rapportato al tempo di presa dati (di cui si trascura l'errore). In Tabella 1 sono elencati i risultati, dove con differenza percentuale si intende la quantità:

$$d = \frac{|\nu_{luce} - \nu_{buio}|}{\nu_{luce}} \cdot 100$$

il cui l'errore è dato da

$$\sigma_d^2 = \left(\frac{1}{\nu_{luce}} \right)^2 \cdot \left(\sigma_{buio}^2 + \left(\frac{\nu_{buio}}{\nu_{luce}} \right)^2 \sigma_{luce}^2 \right) \cdot 100^2$$

PMT	Tensione [V]	ν_{luce} [Hz]	ν_{buio} [Hz]	Diff. percentuale
1	1849	97.88 ± 0.49	98.96 ± 0.50	$(1.11 \pm 0.72)\%$
2	1930	89.90 ± 0.47	89.50 ± 0.47	$(0.44 \pm 0.74)\%$
1 \wedge 2		60.42 ± 0.39	60.13 ± 0.39	$(0.47 \pm 0.91)\%$
3	1930	120.24 ± 0.55	120.00 ± 0.55	$(0.20 \pm 0.64)\%$
4	1911	109.79 ± 0.52	108.55 ± 0.52	$(1.13 \pm 0.67)\%$
3 \wedge 4		65.11 ± 0.40	64.11 ± 0.40	$(1.54 \pm 0.87)\%$
5	1851	135.96 ± 0.58	135.68 ± 0.58	$(0.21 \pm 0.61)\%$
6	1943	97.07 ± 0.49	96.81 ± 0.49	$(0.27 \pm 0.72)\%$
5 \wedge 6		64.11 ± 0.40	63.72 ± 0.40	$(0.61 \pm 0.88)\%$
7	1779	136.61 ± 0.58	136.39 ± 0.58	$(0.16 \pm 0.60)\%$
8	1834	105.16 ± 0.51	108.42 ± 0.52	$(3.10 \pm 0.71)\%$
7 \wedge 8		64.97 ± 0.40	65.93 ± 0.41	$(1.48 \pm 0.89)\%$
9	1691	203.19 ± 0.71	200.97 ± 0.71	$(1.09 \pm 0.49)\%$
10	1849	330.86 ± 0.91	328.99 ± 0.91	$(0.56 \pm 0.39)\%$
9 \wedge 10		145.85 ± 0.60	143.72 ± 0.60	$(1.46 \pm 0.58)\%$
11	1702	69.63 ± 0.42	70.25 ± 0.42	$(0.89 \pm 0.85)\%$
12	1792	50.98 ± 0.36	50.94 ± 0.36	$(0.09 \pm 0.99)\%$
13	1875	36.05 ± 0.30	36.02 ± 0.30	$(0.09 \pm 1.18)\%$
14	1759	35.80 ± 0.30	35.50 ± 0.30	$(0.85 \pm 1.17)\%$

Tabella 1: Prove luce-buio

Come si può vedere, l'isolamento sembra essere molto buono, con differenze poco significative tra le frequenze con luce e buio rispetto all'errore sperimentale, con unica eccezione il PMT

8, con una differenza percentuale del 3.10 %. Tale valore spicca tra gli altri, ma, dopo aver accuratamente controllato di nuovo che non vi fossero punti scoperti o danni al rivestimento degli scintillatori, si è comunque ritenuto che esso non pregiudichi il buon esito delle misure successive e si è deciso di procedere.

3.2 Curve di Plateau

Lo scopo di questa parte dell'esperienza è quello di caratterizzare ciascun fotomoltiplicatore utilizzato, valutando gli andamenti di rumore ed efficienza in funzione della tensione di alimentazione applicata (e del punto di impatto lungo la barra di scintillazione), e determinare, conseguentemente, la tensione di lavoro ottimale di ogni PMT per le fasi successive. In particolare l'efficienza ϵ , data dal rapporto fra gli eventi effettivamente rivelati e gli eventi totali incidenti, aumenta all'aumentare della tensione applicata, fino a raggiungere un livello di saturazione pari circa al valore 1: aumentando ulteriormente la tensione non si ottiene un'efficienza più elevata ma solo un aumento del rumore del sistema in esame. Poiché si vuole ottenere, ovviamente, la massima efficienza possibile minimizzando al tempo stesso il rumore, bisognerà stimare per ciascun PMT il punto di inizio *plateau*. L'efficienza è stata calcolata in riferimento a un *trigger* attraverso la formula:

$$\epsilon = \frac{T \wedge PMT}{T}$$

Il circuito di trigger è stato ottenuto costruendo delle coincidenze fra due nuovi scintillatori accoppiati a PMT singoli, uno di dimensioni maggiori (tracciatore *G*) e uno di dimensioni più ridotte (tracciatore *P*), e degli opportuni PMT dell'apparato sperimentale. Dopo aver effettuato delle veloci prove di luce e buio sul tracciatore grande e su quello piccolo, si sono utilizzate una serie di configurazioni, studiate in modo tale da selezionare i raggi cosmici all'interno del minor angolo solido possibile (essenziale per la buona riuscita delle misure), e di seguito riportate:

- *configurazione 1*: con questa configurazione si sono ottenute le misure per le curve di plateau dei PMT 1, 2, 9, 10, 7, 8. Lo scintillatore grande è stato posizionato sopra la prima *slab* parallelamente all'asse della stessa mentre lo scintillatore piccolo è stato posizionato sotto l'ultima *slab* con l'asse perpendicolare ad essa. Il trigger è dato da: $T = PMT3 \wedge PMT4 \wedge G \wedge P$ e, spostando i tracciatori dall'estremità sinistra all'estremità destra dell'apparato, è possibile stimare sia l'efficienza da vicino che quella da lontano;
- *configurazione 2*: è la configurazione speculare alla precedente: posizionando lo scintillatore piccolo sopra la prima *slab*, con l'asse perpendicolare ad essa, e quello grande sotto l'ultima, con l'asse parallelo ad essa, è possibile stimare l'efficienza per i PMT 5, 6, 3, 4. Il trigger è dato da: $T = PMT1 \wedge PMT2 \wedge G \wedge P$;
- *configurazione 3*: attraverso questa configurazione si sono ottenute le curve di plateau per gli scintillatori laterali PMT 11, 12, 13 in riferimento al PMT 14 attraverso il trigger $T = PMT14 \wedge G \wedge P$. Infatti gli scintillatori laterali sono stati momentaneamente tolti dalla loro posizione e sistemati uno sopra l'altro (partendo basso e andando verso l'alto abbiamo PMT14, PMT11, PMT12 e PMT13); il PMT piccolo è stato sistemato sotto il PMT14 con asse perpendicolare a quest'ultimo e il PMT grande sopra il PMT13 con asse parallelo;
- *configurazione 4*: speculare alla configurazione 3: invertendo le posizioni del tracciatore piccolo e del tracciatore grande si sono ottenute le misure per l'ultimo fotomoltiplicatore (PMT 14) attraverso il trigger $T = PMT13 \wedge G \wedge P$.

Le misure sono state effettuate cercando, per quanto possibile, di variare la tensione di intervalli regolari facendo uso, in particolare, di tre generatori di tensione. Infatti risulta molto utile separare l'alimentazione dei fotomoltiplicatori usati per il circuito di trigger (la cui tensione deve rimanere costante per tutta la serie di misure) e l'alimentazione dei PMT dei quali si vuole stimare l'efficienza. Alimentando il tracciatore grande attraverso un primo generatore, quello piccolo e i due PMT di trigger con il secondo, è stato quindi possibile variare in tutta libertà le tensioni dei PMT studiati attraverso il terzo generatore, agevolando l'aquisizione per le varie misure. Inoltre le tensioni di *G* e di *P* sono state impostate ad un valore abbastanza elevato (rispettivamente a 2465 V e 2202 V) in modo tale da ottenere delle frequenze maggiori di 200 Hz

per i conteggi in singola ed evitare quindi conteggi troppo bassi per i circuiti di trigger. Per quanto riguarda la configurazione 1, le tensioni di lavoro dei fotomoltiplicatori 3 e 4 sono state impostate ai valori di 1910 V e 1950 V osservando il raggiungimento dei plateau per questi PMT, dalla relazione dell'anno precedente. Analogamente per la configurazione 3 è stata impostata una tensione di 1780 V per il PMT14, mentre per le configurazioni speculari 2 e 4 si sono impostate le tensioni osservando i grafici ottenuti con le configurazioni precedenti (1850 V per il PMT1, 1940 V per il PMT2 e 1890 V per il PMT13). Per ogni set di misure si è impostato un tempo sufficientemente lungo per avere una buona statistica, ovvero, tale che l'errore sui conteggi in singola di ogni PMT non superi l'1%.

Sono di seguito riportate le tabelle con i dati raccolti per ciascun PMT; gli errori sulle singole misure sono stati calcolati attribuendo un errore poissoniano pari a \sqrt{N} sui conteggi mentre l'errore sull'efficienza, se si indica con C i conteggi della coincidenza $PMT \wedge T$ e con T i conteggi del trigger, è stato calcolato, per propagazione (essendo C e T statisticamente indipendenti), nel seguente modo:

$$\sigma_\epsilon = \sqrt{\left(\frac{\sigma_C}{T}\right)^2 - \left(\frac{C\sigma_T}{T^2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{C}}{T}\right)^2 - \left(\frac{C\sqrt{T}}{T^2}\right)^2} = \sqrt{\frac{C \cdot (T - C)}{T^3}}$$

In questo modo il valore dell'efficienza con la relativa barra d'errore non supera mai l'unità. I grafici successivamente elaborati sono stati ottenuti servendosi della classe *TEfficiency* di ROOT, che ha svolto automaticamente il calcolo degli errori asimmetrici sull'efficienza. Le curve di plateau sono state fittate partendo dal ginocchio con una funzione della forma:

$$f(x) = \alpha \cdot [1 - \exp(-\beta(x - x_0))]$$

dove α indica l'efficienza massima raggiunta, mentre β e x_0 danno una stima, rispettivamente, di quanto ripida è la salita dell'esponenziale e il punto di intersezione della curva con lo zero. E' importante notare che per una buona riuscita del fit è necessario impostare dei buoni valori di partenza per questi tre parametri.

Per quanto riguarda il rumore, invece, questo è stato stimato come la frequenza di conteggio in singola registrata per ogni PMT e, dopo aver eseguito una media per i punti nei quali erano a disposizione più misure per uno stesso valore della tensione (un conteggio preso da lontano e uno da vicino, per esempio), si sono ottenuti dei grafici che seguono qualitativamente un andamento esponenziale del tipo:

$$f(x) = \exp(a + b \cdot x) + c$$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1900	299.60 ± 0.55	0.236 ± 0.015	0.231 ± 0.015	0.979 ± 0.009
1850	100.38 ± 0.32	0.246 ± 0.016	0.242 ± 0.016	0.984 ± 0.008
1800	48.10 ± 0.22	0.233 ± 0.015	0.230 ± 0.015	0.987 ± 0.007
1775	30.00 ± 0.17	0.286 ± 0.017	0.256 ± 0.016	0.895 ± 0.018
1770	26.18 ± 0.16	0.306 ± 0.018	0.258 ± 0.016	0.843 ± 0.021
1765	23.54 ± 0.15	0.281 ± 0.017	0.210 ± 0.015	0.747 ± 0.026
1760	20.45 ± 0.14	0.291 ± 0.017	0.185 ± 0.014	0.636 ± 0.028
1750	15.22 ± 0.12	0.263 ± 0.016	0.105 ± 0.010	0.399 ± 0.030
1740	10.83 ± 0.10	0.286 ± 0.017	0.080 ± 0.009	0.280 ± 0.027
1725	5.67 ± 0.08	0.326 ± 0.018	0.052 ± 0.007	0.160 ± 0.020

Tabella 2: PMT1, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1900	287.49 ± 0.54	0.378 ± 0.019	0.366 ± 0.019	0.968 ± 0.009
1870	151.59 ± 0.39	0.379 ± 0.019	0.370 ± 0.019	0.976 ± 0.008
1845	91.90 ± 0.30	0.354 ± 0.019	0.347 ± 0.019	0.980 ± 0.007
1830	68.80 ± 0.26	0.417 ± 0.020	0.388 ± 0.020	0.930 ± 0.012
1815	55.55 ± 0.24	0.331 ± 0.018	0.243 ± 0.016	0.734 ± 0.024
1800	44.77 ± 0.21	0.389 ± 0.020	0.191 ± 0.014	0.491 ± 0.025
1785	35.05 ± 0.19	0.369 ± 0.019	0.090 ± 0.009	0.244 ± 0.022

Tabella 3: PMT1, efficienza da lontano.

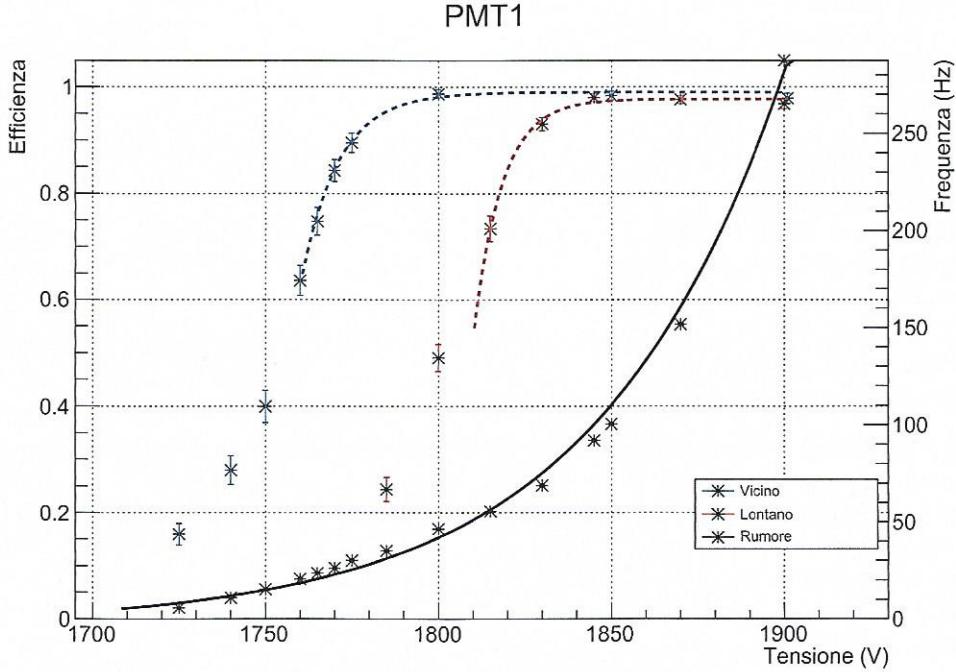


Figura 5: PMT1, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.990 \pm 0.006$ $\beta = 0.092 \pm 0.011 V^{-1}$ $x_0 = 1749 \pm 2 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.977 \pm 0.005$ $\beta = 0.12 \pm 0.02 V^{-1}$ $x_0 = 1804 \pm 2 V$
- rumore: $a = -29.40 \pm 0.08$ $b = 0.01845 \pm 0.00004$ $c = -3.0 \pm 0.1$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1950	130.60 ± 0.36	0.379 ± 0.019	0.371 ± 0.019	0.979 ± 0.009
1900	58.27 ± 0.24	0.354 ± 0.019	0.347 ± 0.019	0.980 ± 0.008
1890	48.88 ± 0.22	0.389 ± 0.020	0.378 ± 0.019	0.972 ± 0.007
1875	39.76 ± 0.20	0.417 ± 0.020	0.404 ± 0.020	0.969 ± 0.012
1850	25.01 ± 0.16	0.331 ± 0.018	0.259 ± 0.016	0.782 ± 0.024
1825	12.17 ± 0.11	0.378 ± 0.019	0.115 ± 0.011	0.304 ± 0.025
1800	4.79 ± 0.07	0.369 ± 0.019	0.042 ± 0.006	0.114 ± 0.022

Tabella 4: PMT2, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1975	222.51 ± 0.47	0.236 ± 0.015	0.230 ± 0.015	0.975 ± 0.010
1950	133.10 ± 0.37	0.246 ± 0.016	0.242 ± 0.016	0.984 ± 0.008
1925	89.42 ± 0.30	0.233 ± 0.015	0.229 ± 0.015	0.983 ± 0.009
1900	58.60 ± 0.24	0.286 ± 0.017	0.225 ± 0.015	0.787 ± 0.024
1890	51.49 ± 0.23	0.326 ± 0.018	0.216 ± 0.015	0.663 ± 0.026
1875	42.13 ± 0.21	0.281 ± 0.017	0.107 ± 0.010	0.381 ± 0.029
1865	35.75 ± 0.19	0.286 ± 0.017	0.083 ± 0.009	0.290 ± 0.027
1840	20.32 ± 0.14	0.263 ± 0.016	0.024 ± 0.005	0.091 ± 0.018
1827	14.59 ± 0.12	0.291 ± 0.017	0.023 ± 0.005	0.079 ± 0.016
1800	4.91 ± 0.07	0.306 ± 0.018	0.005 ± 0.002	0.016 ± 0.007

Tabella 5: PMT2, efficienza da lontano.

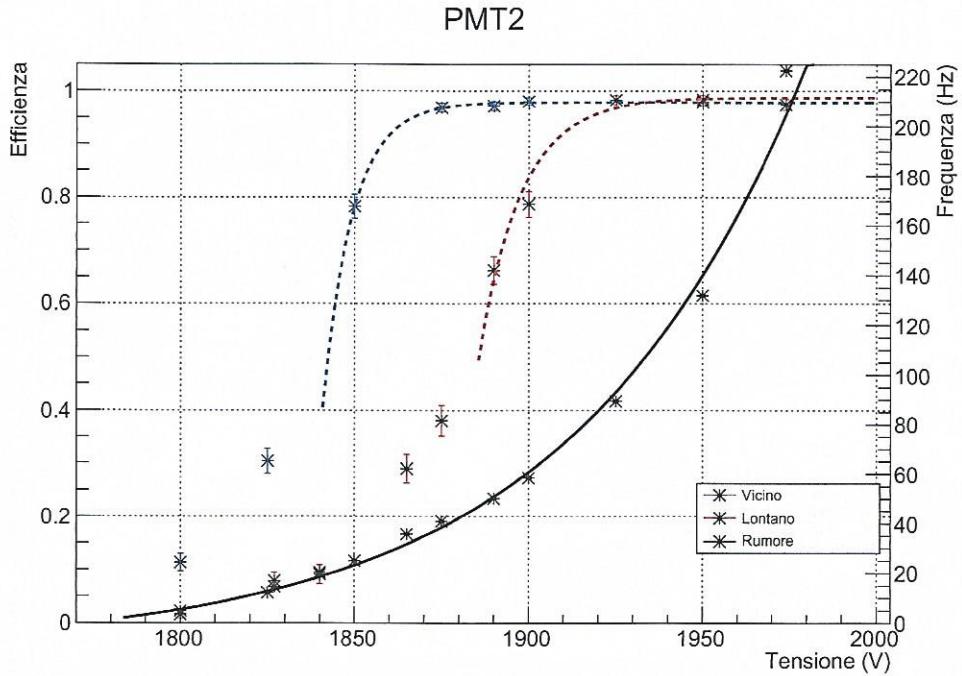


Figura 6: PMT2, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.978 \pm 0.005$ $\beta = 0.116 \pm 0.041 V^{-1}$ $x_0 = 1836 \pm 5 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.988 \pm 0.006$ $\beta = 0.082 \pm 0.011 V^{-1}$ $x_0 = 1877 \pm 2 V$
- rumore: $a = -24.13 \pm 0.09$ $b = 0.01494 \pm 0.00004$ $c = -1.05 \pm 0.15$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1950	147.98 ± 0.38	0.271 ± 0.016	0.263 ± 0.016	0.970 ± 0.010
1900	59.37 ± 0.24	0.265 ± 0.016	0.255 ± 0.016	0.962 ± 0.012
1875	42.93 ± 0.21	0.294 ± 0.017	0.283 ± 0.017	0.963 ± 0.011
1850	27.91 ± 0.17	0.314 ± 0.018	0.253 ± 0.016	0.806 ± 0.022
1835	20.62 ± 0.14	0.302 ± 0.017	0.167 ± 0.013	0.553 ± 0.029
1825	14.95 ± 0.12	0.306 ± 0.018	0.115 ± 0.011	0.376 ± 0.028
1800	6.32 ± 0.08	0.307 ± 0.018	0.062 ± 0.008	0.202 ± 0.023

Tabella 6: PMT3, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
2000	368.43 ± 0.61	0.295 ± 0.017	0.281 ± 0.017	0.953 ± 0.012
1970	209.39 ± 0.46	0.329 ± 0.018	0.312 ± 0.018	0.948 ± 0.012
1920	78.16 ± 0.28	0.306 ± 0.018	0.286 ± 0.017	0.935 ± 0.014
1900	59.54 ± 0.24	0.329 ± 0.018	0.278 ± 0.017	0.845 ± 0.020
1880	46.61 ± 0.22	0.331 ± 0.018	0.174 ± 0.013	0.526 ± 0.027
1870	39.15 ± 0.20	0.335 ± 0.018	0.116 ± 0.011	0.346 ± 0.026
1850	27.14 ± 0.16	0.352 ± 0.019	0.090 ± 0.009	0.256 ± 0.023

Tabella 7: PMT3, efficienza da lontano.

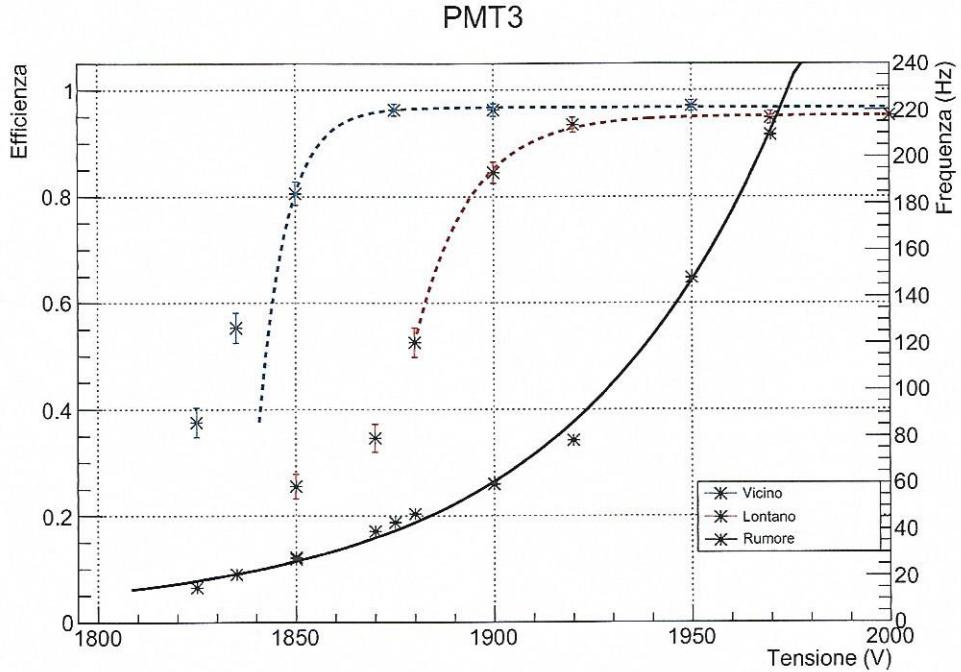


Figura 7: PMT3, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.967 \pm 0.008$ $\beta = 0.141 \pm 0.012 V^{-1}$ $x_0 = 1837 \pm 1 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.952 \pm 0.008$ $\beta = 0.072 \pm 0.010 V^{-1}$ $x_0 = 1869 \pm 2 V$
- rumore: $a = -31.09 \pm 0.09$ $b = 0.01849 \pm 0.00005$ $c = 3.64 \pm 0.17$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1950	202.64 ± 0.45	0.329 ± 0.018	0.313 ± 0.018	0.951 ± 0.012
1900	76.00 ± 0.28	0.306 ± 0.018	0.292 ± 0.017	0.954 ± 0.012
1850	40.05 ± 0.20	0.331 ± 0.018	0.310 ± 0.018	0.937 ± 0.013
1835	31.70 ± 0.18	0.295 ± 0.017	0.243 ± 0.016	0.824 ± 0.022
1825	24.97 ± 0.16	0.329 ± 0.018	0.198 ± 0.014	0.602 ± 0.027
1800	12.34 ± 0.11	0.352 ± 0.019	0.122 ± 0.011	0.347 ± 0.025
1770	4.18 ± 0.06	0.335 ± 0.018	0.039 ± 0.006	0.116 ± 0.018

Tabella 8: PMT4, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1975	341.20 ± 0.58	0.271 ± 0.016	0.263 ± 0.016	0.970 ± 0.010
1925	133.57 ± 0.37	0.265 ± 0.016	0.255 ± 0.016	0.962 ± 0.012
1900	75.48 ± 0.27	0.294 ± 0.017	0.274 ± 0.017	0.932 ± 0.015
1875	54.27 ± 0.23	0.314 ± 0.018	0.237 ± 0.015	0.755 ± 0.024
1860	44.30 ± 0.21	0.302 ± 0.017	0.145 ± 0.012	0.480 ± 0.029
1850	36.75 ± 0.19	0.306 ± 0.018	0.095 ± 0.010	0.310 ± 0.026
1825	3.36 ± 0.06	0.307 ± 0.018	0.050 ± 0.007	0.163 ± 0.021

Tabella 9: PMT4, efficienza da lontano.

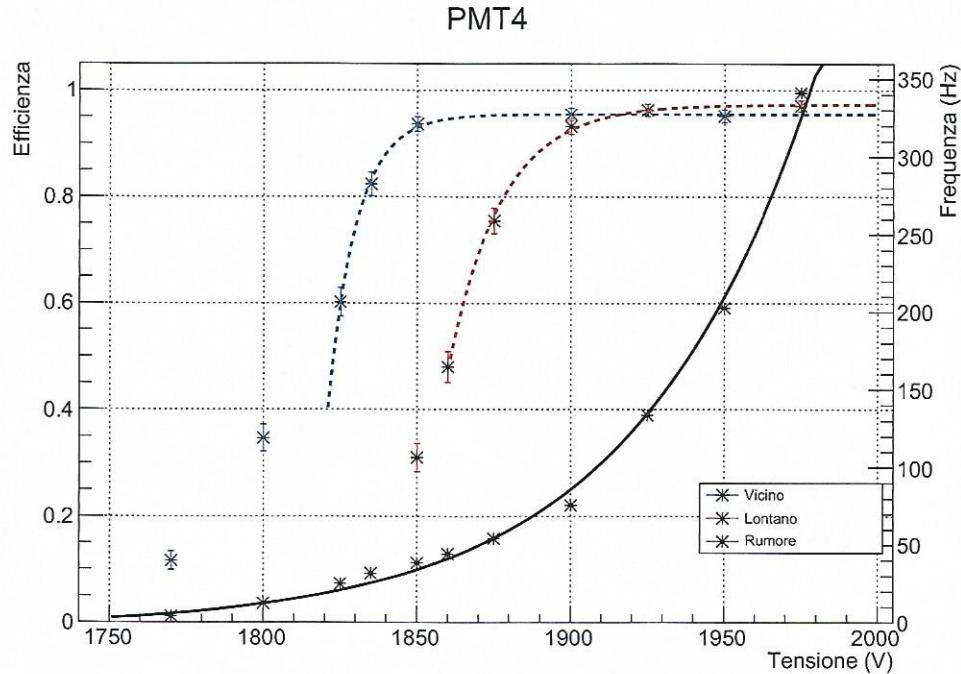


Figura 8: PMT4, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.954 \pm 0.008$ $\beta = 0.107 \pm 0.016 V^{-1}$ $x_0 = 1816 \pm 2 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.973 \pm 0.008$ $\beta = 0.058 \pm 0.006 V^{-1}$ $x_0 = 1849 \pm 2 V$
- rumore: $a = -28.50 \pm 0.07$ $b = 0.01737 \pm 0.00004$ $c = -3.52 \pm 0.11$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1875	165.76 ± 0.41	0.271 ± 0.016	0.260 ± 0.016	0.959 ± 0.012
1850	105.75 ± 0.33	0.307 ± 0.018	0.295 ± 0.017	0.961 ± 0.011
1825	65.48 ± 0.26	0.265 ± 0.016	0.257 ± 0.016	0.970 ± 0.011
1775	30.60 ± 0.18	0.314 ± 0.018	0.270 ± 0.016	0.860 ± 0.020
1750	19.19 ± 0.14	0.306 ± 0.018	0.149 ± 0.012	0.487 ± 0.029
1740	12.58 ± 0.11	0.302 ± 0.017	0.098 ± 0.010	0.325 ± 0.027
1725	7.27 ± 0.09	0.294 ± 0.017	0.056 ± 0.007	0.190 ± 0.023

Tabella 10: PMT5, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1950	578.15 ± 0.76	0.329 ± 0.018	0.321 ± 0.018	0.976 ± 0.008
1900	231.97 ± 0.48	0.329 ± 0.018	0.309 ± 0.018	0.939 ± 0.013
1850	86.12 ± 0.29	0.306 ± 0.018	0.294 ± 0.017	0.961 ± 0.011
1825	66.06 ± 0.26	0.331 ± 0.018	0.283 ± 0.017	0.855 ± 0.019
1820	61.68 ± 0.25	0.335 ± 0.018	0.283 ± 0.017	0.845 ± 0.020
1815	50.96 ± 0.23	0.295 ± 0.017	0.170 ± 0.013	0.576 ± 0.029
1800	40.53 ± 0.20	0.352 ± 0.019	0.117 ± 0.011	0.332 ± 0.025

Tabella 11: PMT5, efficienza da lontano.

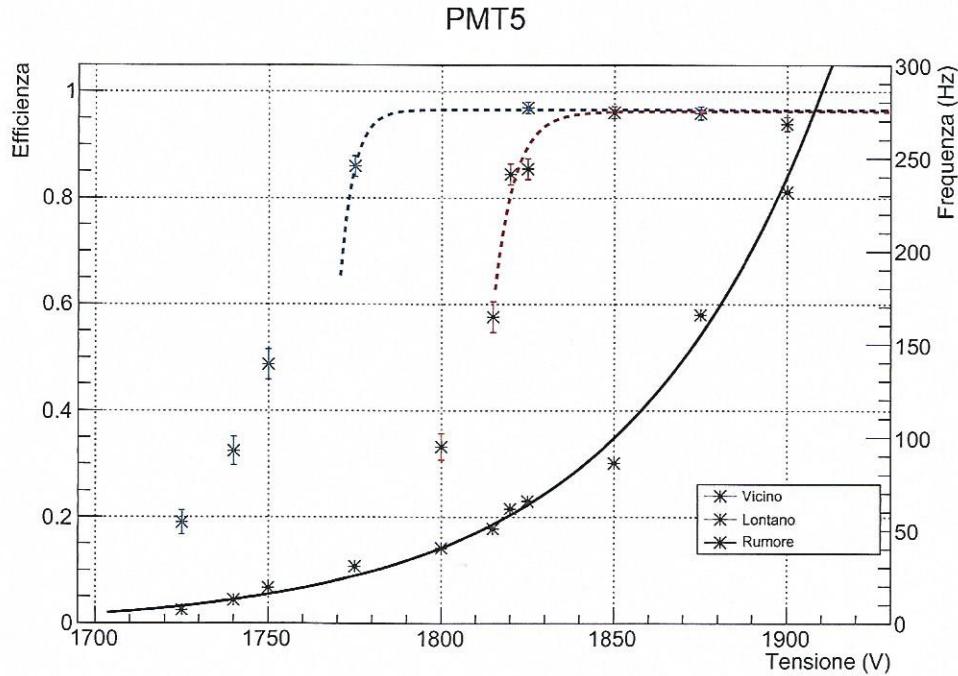


Figura 9: PMT5, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.965 \pm 0.008$ $\beta = 0.263 \pm 0.033 V^{-1}$ $x_0 = 1767 \pm 11 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.962 \pm 0.006$ $\beta = 0.174 \pm 0.027 V^{-1}$ $x_0 = 1809 \pm 1 V$
- rumore: $a = -27.39 \pm 0.07$ $b = 0.01730 \pm 0.00004$ $c = -2.40 \pm 0.14$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1975	174.31 ± 0.42	0.329 ± 0.018	0.321 ± 0.018	0.976 ± 0.008
1950	110.64 ± 0.33	0.329 ± 0.018	0.309 ± 0.018	0.939 ± 0.013
1900	53.54 ± 0.23	0.306 ± 0.018	0.295 ± 0.017	0.964 ± 0.011
1875	40.34 ± 0.20	0.331 ± 0.018	0.307 ± 0.018	0.927 ± 0.014
1850	26.07 ± 0.16	0.352 ± 0.019	0.269 ± 0.016	0.764 ± 0.023
1825	13.62 ± 0.12	0.295 ± 0.017	0.101 ± 0.010	0.342 ± 0.028
1800	6.88 ± 0.08	0.335 ± 0.018	0.071 ± 0.008	0.212 ± 0.022

Tabella 12: PMT6, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
2000	266.91 ± 0.52	0.265 ± 0.016	0.258 ± 0.016	0.974 ± 0.010
1975	170.57 ± 0.41	0.306 ± 0.018	0.289 ± 0.017	0.944 ± 0.013
1950	112.04 ± 0.33	0.271 ± 0.016	0.259 ± 0.016	0.956 ± 0.012
1925	73.60 ± 0.27	0.294 ± 0.017	0.263 ± 0.016	0.895 ± 0.018
1910	62.02 ± 0.25	0.307 ± 0.018	0.243 ± 0.016	0.792 ± 0.023
1900	52.89 ± 0.23	0.314 ± 0.018	0.186 ± 0.014	0.592 ± 0.028
1875	38.14 ± 0.20	0.302 ± 0.017	0.098 ± 0.010	0.325 ± 0.027

Tabella 13: PMT6, efficienza da lontano.

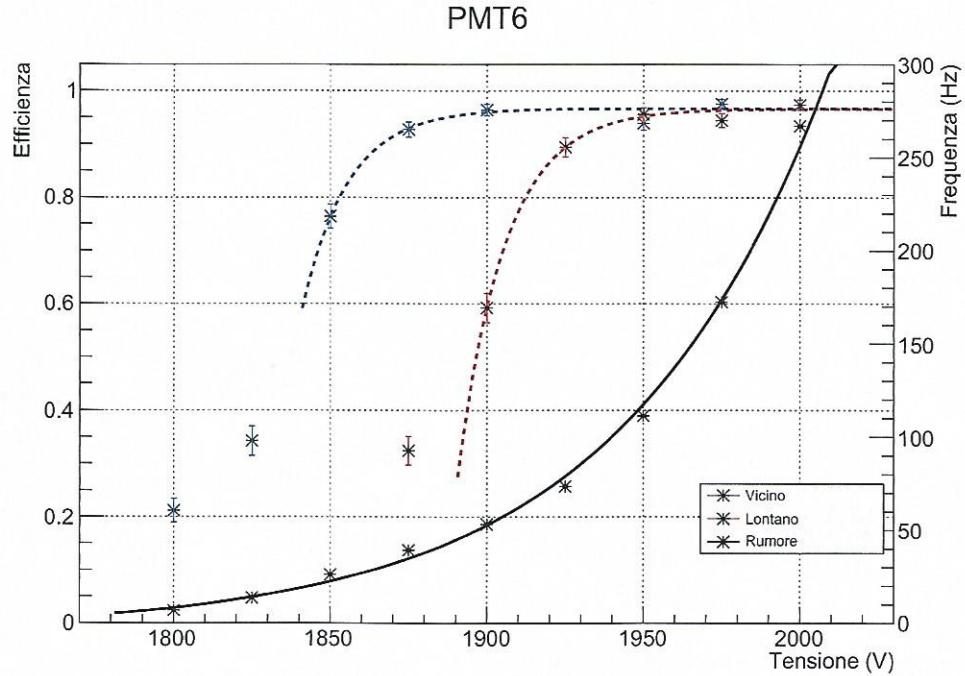


Figura 10: PMT6, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.966 \pm 0.007$ $\beta = 0.068 \pm 0.017 V^{-1}$ $x_0 = 1827 \pm 6 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.966 \pm 0.008$ $\beta = 0.066 \pm 0.011 V^{-1}$ $x_0 = 1886 \pm 3 V$
- rumore: $a = -27.39 \pm 0.07$ $b = 0.01730 \pm 0.00004$ $c = -2.40 \pm 0.14$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1800	240.07 ± 0.49	0.236 ± 0.015	0.229 ± 0.015	0.970 ± 0.011
1781	152.37 ± 0.39	0.246 ± 0.016	0.239 ± 0.015	0.972 ± 0.011
1760	103.02 ± 0.32	0.233 ± 0.015	0.227 ± 0.015	0.974 ± 0.010
1740	65.39 ± 0.26	0.286 ± 0.017	0.278 ± 0.017	0.972 ± 0.010
1720	48.24 ± 0.22	0.281 ± 0.017	0.274 ± 0.017	0.975 ± 0.009
1700	33.06 ± 0.18	0.286 ± 0.017	0.267 ± 0.016	0.934 ± 0.015
1690	25.46 ± 0.16	0.306 ± 0.018	0.249 ± 0.016	0.814 ± 0.022
1680	18.99 ± 0.14	0.326 ± 0.018	0.187 ± 0.014	0.574 ± 0.027
1670	12.91 ± 0.11	0.291 ± 0.017	0.111 ± 0.011	0.381 ± 0.028
1650	5.03 ± 0.07	0.263 ± 0.016	0.032 ± 0.006	0.122 ± 0.020

Tabella 14: PMT7, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1820	338.85 ± 0.58	0.378 ± 0.019	0.366 ± 0.019	0.968 ± 0.009
1790	179.95 ± 0.42	0.379 ± 0.019	0.364 ± 0.019	0.960 ± 0.010
1760	94.71 ± 0.31	0.354 ± 0.019	0.343 ± 0.019	0.969 ± 0.009
1745	66.78 ± 0.26	0.417 ± 0.020	0.386 ± 0.020	0.926 ± 0.013
1730	54.15 ± 0.23	0.331 ± 0.018	0.233 ± 0.015	0.704 ± 0.025
1720	44.70 ± 0.21	0.389 ± 0.020	0.178 ± 0.013	0.458 ± 0.025
1700	31.17 ± 0.18	0.369 ± 0.019	0.078 ± 0.009	0.211 ± 0.021

Tabella 15: PMT7, efficienza da lontano.

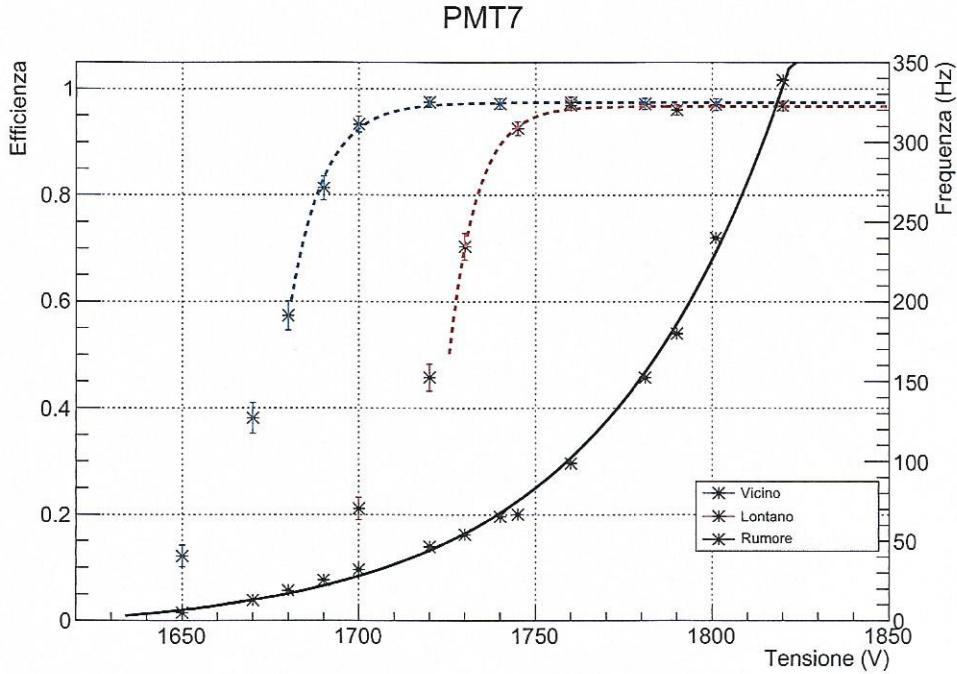


Figura 11: PMT7, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.975 \pm 0.004$ $\beta = 0.106 \pm 0.012 V^{-1}$ $x_0 = 1672 \pm 1 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.968 \pm 0.006$ $\beta = 0.129 \pm 0.024 V^{-1}$ $x_0 = 1720 \pm 2 V$
- rumore: $a = -27.95 \pm 0.09$ $b = 0.01850 \pm 0.00005$ $c = -5.64 \pm 0.16$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1830	68.77 ± 0.26	0.379 ± 0.019	0.364 ± 0.019	0.960 ± 0.010
1815	55.17 ± 0.23	0.417 ± 0.020	0.408 ± 0.020	0.978 ± 0.007
1800	46.33 ± 0.22	0.354 ± 0.019	0.345 ± 0.019	0.975 ± 0.008
1770	27.89 ± 0.17	0.331 ± 0.018	0.284 ± 0.017	0.858 ± 0.019
1765	26.24 ± 0.16	0.369 ± 0.019	0.298 ± 0.017	0.808 ± 0.021
1755	19.52 ± 0.14	0.389 ± 0.020	0.205 ± 0.014	0.527 ± 0.025
1730	9.33 ± 0.10	0.378 ± 0.019	0.097 ± 0.010	0.257 ± 0.022

Tabella 16: PMT8, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1975	642.93 ± 0.80	0.236 ± 0.015	0.230 ± 0.015	0.975 ± 0.010
1950	469.57 ± 0.69	0.246 ± 0.016	0.239 ± 0.015	0.972 ± 0.011
1925	356.67 ± 0.60	0.233 ± 0.015	0.227 ± 0.015	0.974 ± 0.010
1900	232.21 ± 0.48	0.286 ± 0.017	0.278 ± 0.017	0.972 ± 0.010
1875	146.35 ± 0.38	0.281 ± 0.017	0.275 ± 0.017	0.979 ± 0.009
1850	94.19 ± 0.31	0.286 ± 0.017	0.275 ± 0.017	0.962 ± 0.011
1825	63.58 ± 0.25	0.326 ± 0.018	0.279 ± 0.017	0.856 ± 0.019
1815	56.69 ± 0.24	0.306 ± 0.018	0.222 ± 0.015	0.725 ± 0.026
1800	45.90 ± 0.21	0.291 ± 0.017	0.116 ± 0.011	0.399 ± 0.029
1775	31.12 ± 0.18	0.263 ± 0.016	0.039 ± 0.006	0.148 ± 0.022

Tabella 17: PMT8, efficienza da lontano.

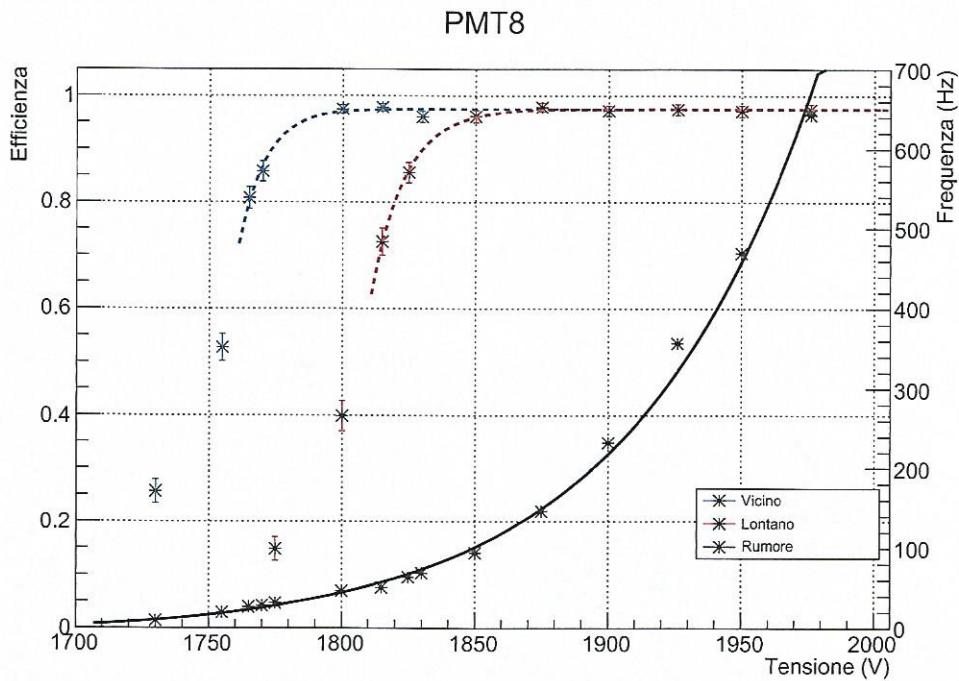


Figura 12: PMT8, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.975 \pm 0.005$ $\beta = 0.099 \pm 0.029 V^{-1}$ $x_0 = 1748 \pm 6 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.975 \pm 0.004$ $\beta = 0.080 \pm 0.015 V^{-1}$ $x_0 = 1798 \pm 3 V$
- rumore: $a = -21.54 \pm 0.04$ $b = 0.01420 \pm 0.00002$ $c = -10.53 \pm 0.14$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1745	523.35 ± 0.72	0.236 ± 0.015	0.230 ± 0.015	0.975 ± 0.010
1693	252.28 ± 0.50	0.246 ± 0.016	0.238 ± 0.015	0.967 ± 0.011
1656	140.55 ± 0.38	0.233 ± 0.015	0.227 ± 0.015	0.974 ± 0.010
1625	80.53 ± 0.28	0.286 ± 0.017	0.277 ± 0.017	0.969 ± 0.010
1595	53.31 ± 0.23	0.281 ± 0.017	0.272 ± 0.017	0.968 ± 0.011
1575	41.08 ± 0.20	0.286 ± 0.017	0.274 ± 0.017	0.958 ± 0.012
1555	29.85 ± 0.17	0.326 ± 0.018	0.298 ± 0.017	0.914 ± 0.016
1535	19.99 ± 0.14	0.306 ± 0.018	0.185 ± 0.014	0.605 ± 0.028
1510	9.60 ± 0.10	0.291 ± 0.017	0.073 ± 0.009	0.251 ± 0.025
1490	4.44 ± 0.07	0.263 ± 0.016	0.027 ± 0.005	0.103 ± 0.019

Tabella 18: PMT9, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1700	287.96 ± 0.54	0.369 ± 0.019	0.349 ± 0.019	0.946 ± 0.012
1675	193.85 ± 0.44	0.378 ± 0.019	0.362 ± 0.019	0.958 ± 0.010
1650	120.97 ± 0.35	0.354 ± 0.019	0.344 ± 0.019	0.972 ± 0.009
1625	78.04 ± 0.28	0.331 ± 0.018	0.311 ± 0.018	0.940 ± 0.013
1615	68.08 ± 0.26	0.417 ± 0.020	0.361 ± 0.019	0.866 ± 0.017
1600	55.73 ± 0.24	0.379 ± 0.019	0.245 ± 0.016	0.646 ± 0.025
1585	45.25 ± 0.21	0.389 ± 0.020	0.151 ± 0.012	0.388 ± 0.025

Tabella 19: PMT9, efficienza da lontano.

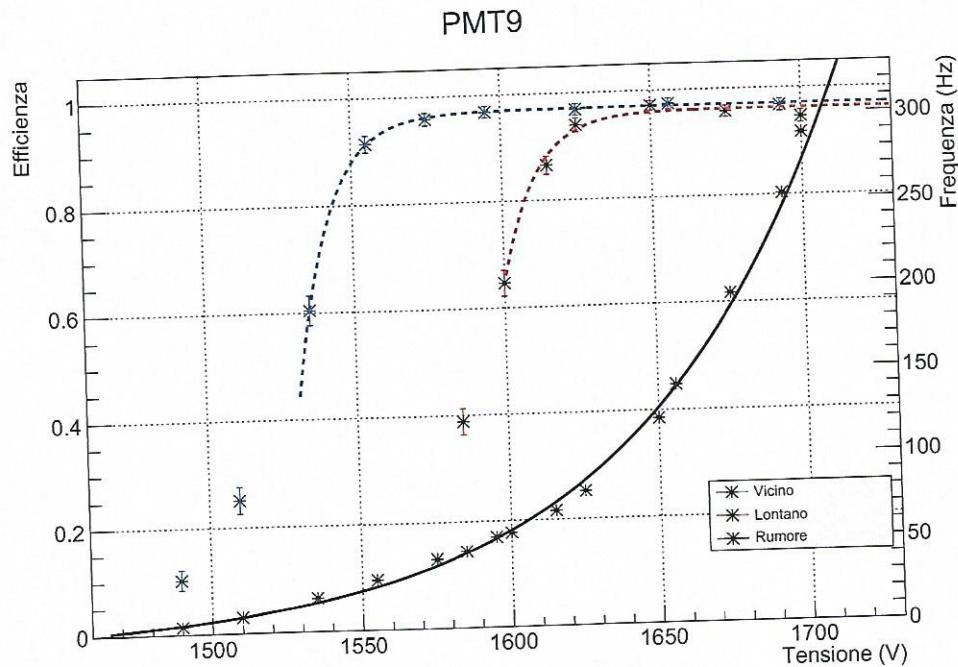


Figura 13: PMT9, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.971 \pm 0.004$ $\beta = 0.092 \pm 0.014 V^{-1}$ $x_0 = 1524 \pm 2 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.963 \pm 0.006$ $\beta = 0.091 \pm 0.011 V^{-1}$ $x_0 = 1588 \pm 2 V$
- rumore: $a = -19.23 \pm 0.04$ $b = 0.01463 \pm 0.00002$ $c = -7.80 \pm 0.11$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1790	102.37 ± 0.32	0.369 ± 0.019	0.350 ± 0.019	0.949 ± 0.012
1775	77.53 ± 0.28	0.378 ± 0.019	0.369 ± 0.019	0.976 ± 0.008
1750	51.60 ± 0.23	0.354 ± 0.019	0.343 ± 0.019	0.969 ± 0.009
1725	34.94 ± 0.19	0.331 ± 0.018	0.315 ± 0.018	0.952 ± 0.012
1715	29.46 ± 0.17	0.417 ± 0.020	0.369 ± 0.019	0.885 ± 0.016
1700	19.14 ± 0.14	0.379 ± 0.019	0.194 ± 0.014	0.512 ± 0.026
1690	13.51 ± 0.12	0.389 ± 0.020	0.114 ± 0.011	0.293 ± 0.023

Tabella 20: PMT10, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1900	676.18 ± 0.82	0.236 ± 0.015	0.229 ± 0.015	0.970 ± 0.011
1875	475.33 ± 0.69	0.246 ± 0.016	0.240 ± 0.016	0.976 ± 0.010
1850	346.15 ± 0.59	0.233 ± 0.015	0.227 ± 0.015	0.974 ± 0.010
1825	208.75 ± 0.46	0.286 ± 0.017	0.277 ± 0.017	0.969 ± 0.010
1800	123.73 ± 0.35	0.281 ± 0.017	0.272 ± 0.017	0.968 ± 0.011
1775	75.43 ± 0.27	0.286 ± 0.017	0.272 ± 0.017	0.951 ± 0.013
1760	59.11 ± 0.24	0.306 ± 0.018	0.236 ± 0.015	0.771 ± 0.024
1750	52.68 ± 0.23	0.326 ± 0.018	0.207 ± 0.014	0.635 ± 0.027
1725	34.12 ± 0.18	0.291 ± 0.017	0.053 ± 0.007	0.182 ± 0.023
1700	18.41 ± 0.14	0.263 ± 0.016	0.025 ± 0.005	0.095 ± 0.018

Tabella 21: PMT10, efficienza da lontano.

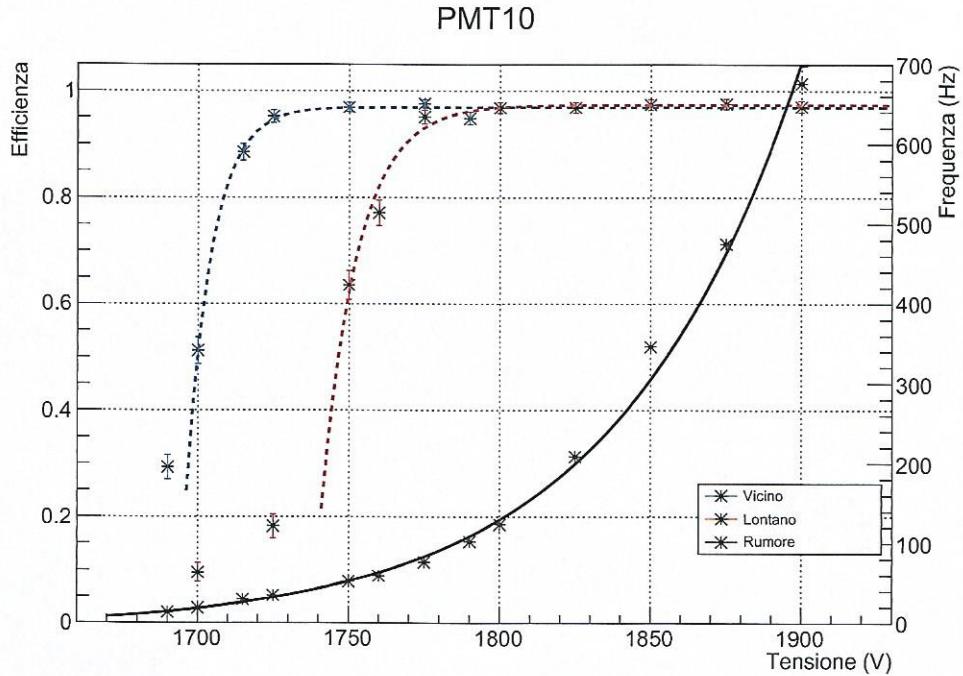


Figura 14: PMT10, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.969 \pm 0.005$ $\beta = 0.118 \pm 0.013 V^{-1}$ $x_0 = 1694 \pm 1 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.974 \pm 0.005$ $\beta = 0.084 \pm 0.010 V^{-1}$ $x_0 = 1738 \pm 2 V$
- rumore: $a = -24.55 \pm 0.07$ $b = 0.01638 \pm 0.00003$ $c = -8.47 \pm 0.24$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1750	295.25 ± 0.81	0.918 ± 0.045	0.911 ± 0.045	0.993 ± 0.004
1720	133.54 ± 0.54	0.949 ± 0.046	0.942 ± 0.046	0.993 ± 0.004
1670	46.99 ± 0.32	0.989 ± 0.047	0.964 ± 0.046	0.975 ± 0.007
1655	29.43 ± 0.23	0.875 ± 0.040	0.673 ± 0.035	0.769 ± 0.019
1645	22.44 ± 0.22	0.887 ± 0.044	0.531 ± 0.034	0.599 ± 0.025
1635	15.35 ± 0.15	1.016 ± 0.038	0.389 ± 0.024	0.383 ± 0.018
1625	8.98 ± 0.11	0.953 ± 0.037	0.214 ± 0.017	0.225 ± 0.016

Tabella 22: PMT11, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1800	1646.60 ± 1.91	1.511 ± 0.058	1.509 ± 0.058	0.999 ± 0.001
1750	348.73 ± 0.88	1.467 ± 0.057	1.462 ± 0.057	0.997 ± 0.002
1725	150.91 ± 0.58	1.469 ± 0.057	1.462 ± 0.057	0.995 ± 0.003
1700	84.64 ± 0.43	1.502 ± 0.058	1.442 ± 0.057	0.960 ± 0.008
1685	64.13 ± 0.38	1.531 ± 0.058	1.156 ± 0.051	0.755 ± 0.016
1675	50.04 ± 0.33	1.440 ± 0.057	0.678 ± 0.039	0.471 ± 0.020
1650	27.01 ± 0.20	1.480 ± 0.048	0.205 ± 0.018	0.138 ± 0.011

Tabella 23: PMT11, efficienza da lontano.

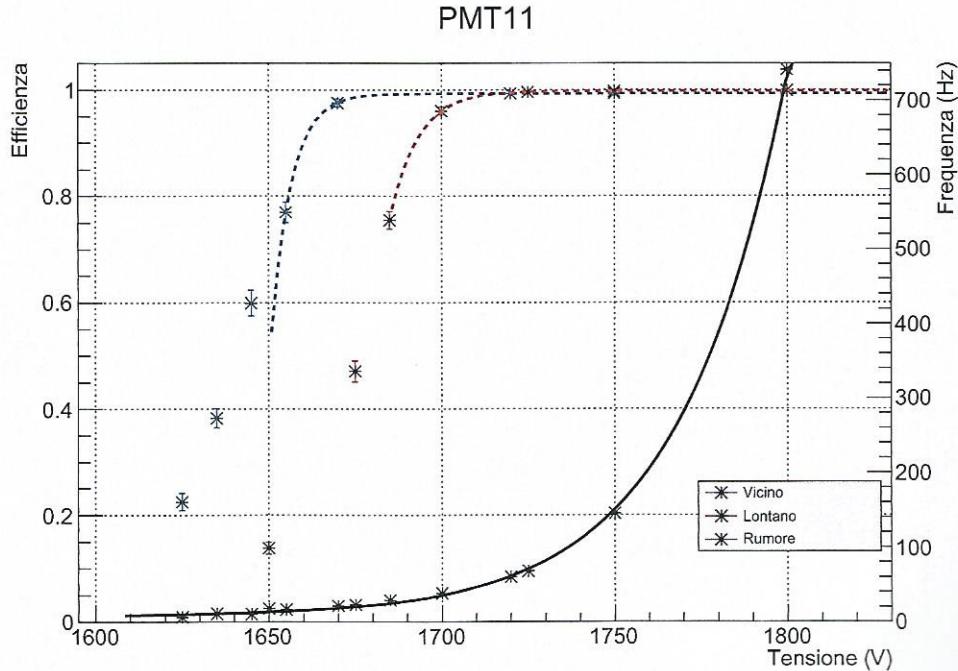


Figura 15: PMT11, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.993 \pm 0.003$ $\beta = 0.170 \pm 0.030 V^{-1}$ $x_0 = 1646 \pm 2 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.998 \pm 0.001$ $\beta = 0.122 \pm 0.013 V^{-1}$ $x_0 = 1673 \pm 2 V$
- rumore: $a = -52.04 \pm 0.07$ $b = 0.03257 \pm 0.00004$ $c = 7.44 \pm 0.05$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1860	187.56 ± 0.65	1.511 ± 0.058	1.504 ± 0.058	0.996 ± 0.003
1810	73.70 ± 0.40	1.467 ± 0.057	1.460 ± 0.057	0.995 ± 0.003
1785	48.28 ± 0.33	1.469 ± 0.057	1.416 ± 0.056	0.964 ± 0.007
1770	33.47 ± 0.27	1.440 ± 0.057	1.251 ± 0.053	0.869 ± 0.013
1760	26.30 ± 0.24	1.502 ± 0.058	0.991 ± 0.047	0.660 ± 0.018
1750	19.66 ± 0.21	1.531 ± 0.058	0.673 ± 0.039	0.440 ± 0.019
1725	7.86 ± 0.11	1.480 ± 0.048	0.218 ± 0.018	0.148 ± 0.011

Tabella 24: PMT12, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1890	359.55 ± 0.89	0.918 ± 0.045	0.911 ± 0.045	0.993 ± 0.004
1860	187.88 ± 0.65	0.949 ± 0.046	0.936 ± 0.046	0.986 ± 0.006
1835	110.42 ± 0.50	0.887 ± 0.044	0.878 ± 0.044	0.990 ± 0.005
1810	75.02 ± 0.41	0.989 ± 0.047	0.844 ± 0.043	0.854 ± 0.017
1795	56.93 ± 0.29	0.953 ± 0.037	0.556 ± 0.028	0.583 ± 0.019
1785	46.85 ± 0.29	0.875 ± 0.040	0.335 ± 0.025	0.383 ± 0.022
1770	34.11 ± 0.22	1.016 ± 0.038	0.231 ± 0.018	0.228 ± 0.016

Tabella 25: PMT12, efficienza da lontano.

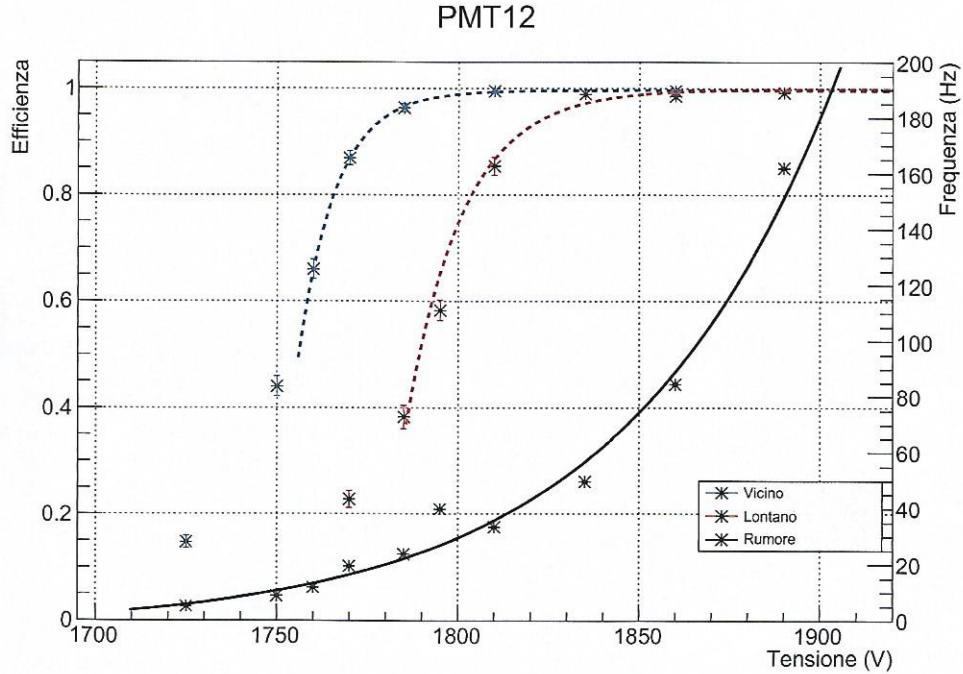


Figura 16: PMT12, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.997 \pm 0.002$ $\beta = 0.096 \pm 0.008 V^{-1}$ $x_0 = 1749 \pm 1 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.994 \pm 0.003$ $\beta = 0.087 \pm 0.008 V^{-1}$ $x_0 = 1785 \pm 1 V$
- rumore: $a = -27.48 \pm 0.16$ $b = 0.01720 \pm 0.00008$ $c = -3.22 \pm 0.17$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1920	205.62 ± 0.68	0.918 ± 0.045	0.913 ± 0.045	0.995 ± 0.003
1880	95.05 ± 0.46	0.949 ± 0.046	0.936 ± 0.046	0.986 ± 0.006
1855	63.68 ± 0.38	0.887 ± 0.044	0.880 ± 0.044	0.992 ± 0.004
1830	38.62 ± 0.29	0.989 ± 0.047	0.907 ± 0.045	0.917 ± 0.013
1815	26.37 ± 0.19	0.953 ± 0.037	0.684 ± 0.031	0.718 ± 0.017
1805	19.19 ± 0.17	1.016 ± 0.038	0.521 ± 0.027	0.513 ± 0.019
1790	10.43 ± 0.14	0.875 ± 0.040	0.213 ± 0.020	0.243 ± 0.020

Tabella 26: PMT13, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1960	495.09 ± 1.05	1.511 ± 0.058	1.502 ± 0.058	0.994 ± 0.003
1910	166.62 ± 0.61	1.467 ± 0.057	1.458 ± 0.057	0.994 ± 0.003
1885	101.12 ± 0.47	1.469 ± 0.057	1.440 ± 0.057	0.980 ± 0.005
1860	69.21 ± 0.39	1.502 ± 0.058	1.180 ± 0.051	0.786 ± 0.016
1850	58.79 ± 0.30	1.480 ± 0.048	0.894 ± 0.037	0.604 ± 0.016
1846	53.31 ± 0.34	1.440 ± 0.057	0.718 ± 0.040	0.498 ± 0.020
1820	30.56 ± 0.26	1.531 ± 0.058	0.222 ± 0.022	0.145 ± 0.013

Tabella 27: PMT13, efficienza da lontano.

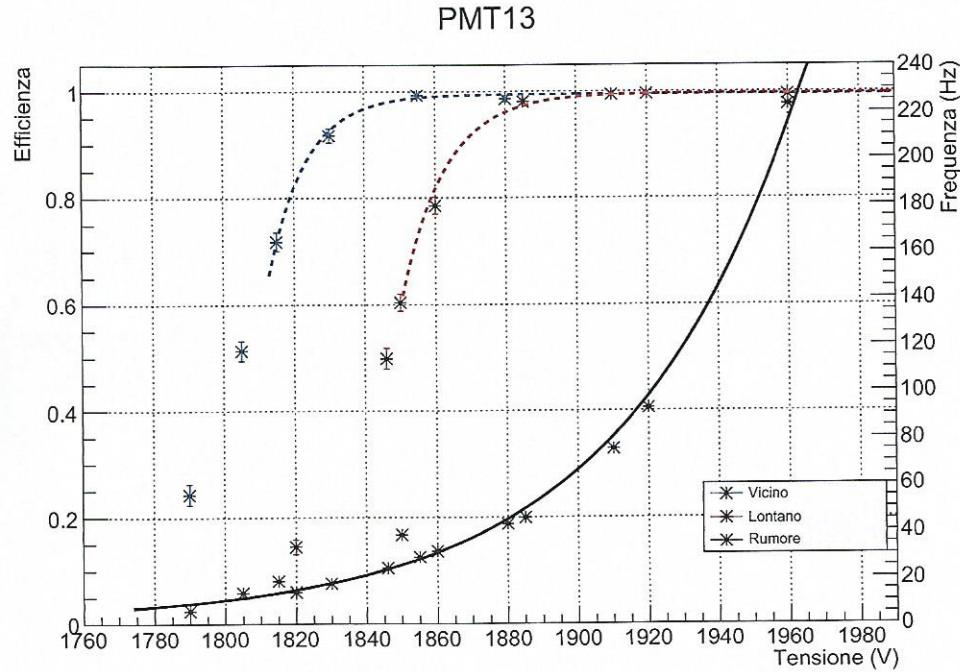


Figura 17: PMT13, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.995 \pm 0.003$ $\beta = 0.093 \pm 0.011 V^{-1}$ $x_0 = 1801 \pm 2 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.996 \pm 0.002$ $\beta = 0.081 \pm 0.006 V^{-1}$ $x_0 = 1839 \pm 1 V$
- rumore: $a = -33.71 \pm 0.12$ $b = 0.01994 \pm 0.000006$ $c = 1.57 \pm 0.11$

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1820	434.07 ± 0.98	1.540 ± 0.058	1.536 ± 0.058	0.997 ± 0.002
1780	145.57 ± 0.57	1.564 ± 0.059	1.560 ± 0.059	0.997 ± 0.002
1730	44.15 ± 0.31	1.513 ± 0.058	1.449 ± 0.057	0.957 ± 0.008
1725	37.58 ± 0.29	1.476 ± 0.057	1.322 ± 0.054	0.896 ± 0.012
1715	29.45 ± 0.26	1.604 ± 0.060	1.160 ± 0.051	0.723 ± 0.017
1705	20.28 ± 0.21	1.518 ± 0.058	0.644 ± 0.038	0.425 ± 0.019
1680	5.67 ± 0.09	1.516 ± 0.047	0.163 ± 0.015	0.107 ± 0.010

Tabella 28: PMT14, efficienza da vicino.

Tensione [V]	ν_{PMT} [Hz]	$\nu_{trigger}$ [Hz]	$\nu_{coinc.}$ [Hz]	ϵ
1850	920.39 ± 1.43	1.600 ± 0.060	1.593 ± 0.060	0.996 ± 0.002
1800	223.33 ± 0.70	1.576 ± 0.059	1.567 ± 0.059	0.994 ± 0.003
1775	119.86 ± 0.52	1.662 ± 0.061	1.656 ± 0.061	0.996 ± 0.002
1760	84.48 ± 0.43	1.538 ± 0.058	1.460 ± 0.057	0.949 ± 0.008
1750	67.23 ± 0.39	1.587 ± 0.059	1.220 ± 0.052	0.769 ± 0.016
1740	57.18 ± 0.36	1.558 ± 0.059	0.916 ± 0.045	0.588 ± 0.019
1725	38.38 ± 0.29	1.758 ± 0.062	0.460 ± 0.032	0.262 ± 0.016

Tabella 29: PMT14, efficienza da lontano.

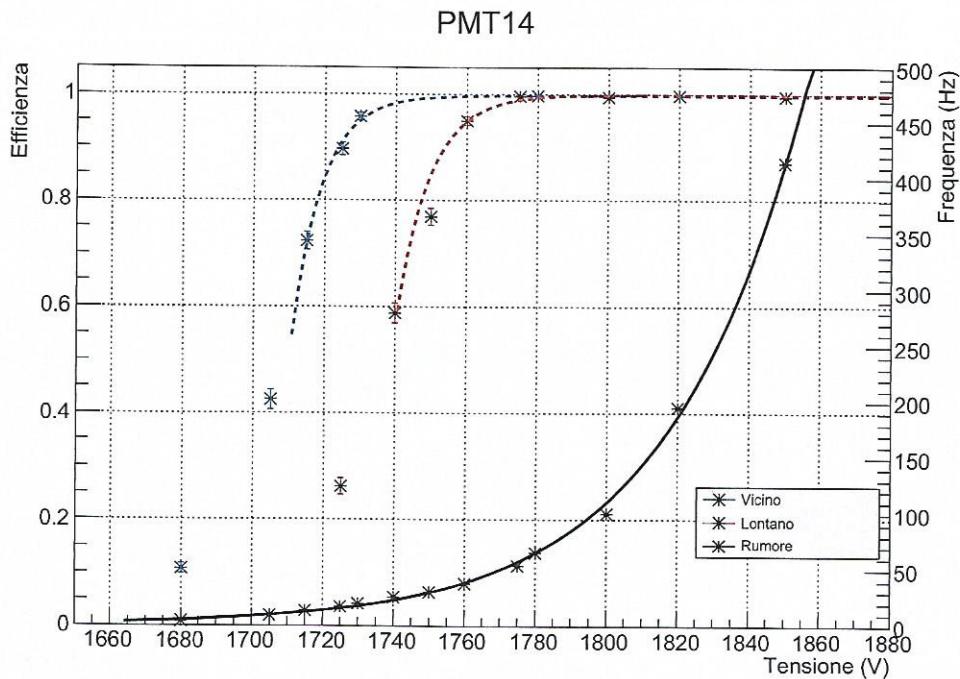


Figura 18: PMT14, curva di efficienza e rumore.

Risultati fit:

- efficienza da vicino: $\alpha = 0.997 \pm 0.001$ $\beta = 0.117 \pm 0.010 V^{-1}$ $x_0 = 1704 \pm 1 V$
- efficienza da lontano: $\alpha = 0.999 \pm 0.002$ $\beta = 0.107 \pm 0.005 V^{-1}$ $x_0 = 1732 \pm 1 V$
- rumore: $a = -42.76 \pm 0.21$ $b = 0.02637 \pm 0.00011$ $c = 4.44 \pm 0.17$

4 Circuiti logici

In questa parte dell'esperienza sono stati costruiti alcuni circuiti logici, misurandone la frequenza di conteggio, con lo scopo di prendere dimestichezza con vari moduli di elettronica e, in particolare, di definire dei buoni circuiti di **START** e di **STOP**, essenziali per la corretta acquisizione finale dello spettro.

Inanzitutto sono state stabilite le tensioni di lavoro definitive a cui alimentare i fotomoltiplicatori; partendo dall'osservazione dei grafici di *plateau* è stata scelta una tensione provvisoria a cui alimentare ogni fotomoltiplicatore, corrispondente all'incirca al punto in cui inizia il plateau: in questo modo si ottiene un'alta efficienza con un rumore elettronico il più basso possibile. Sono state quindi effettuate delle prove di conteggio in singola e in coincidenza per le slab centrali. Le tensioni sono state regolate in maniera da ottenere una frequenza simile per ogni slab e facendo in modo che la frequenza decresca dalla slab superiore a quella inferiore. Le prove di conteggio sono state effettuate anche per i fotomoltiplicatori laterali e le tensioni sono state regolate in modo tale da avere all'incirca le stesse frequenze anche per queste slab.

Sono quindi stati costruiti alcuni circuiti logici che saranno poi utilizzati in fase di acquisizione e sono state effettuate delle prove di conteggio. Successivamente si sono ripetute le stesse prove dopo aver posizionato lo strato di piombo sopra l'apparato in modo tale da bloccare la componente molle dei raggi cosmici.

Come già citato sono particolarmente importanti i seguenti circuiti logici:

- **Circuito di START:** permette l'identificazione dell'ingresso di un muone nell'apparato.

Il circuito:

$$START = S1 \wedge \overline{(S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)}$$

seleziona gli eventi che entrano dalla prima slab e non escono né lateralmente né dalla slab inferiore, in questo modo si selezionano gli eventi che effettivamente decadono all'interno dell'apparato.

- **Circuito di STOP:** identifica l'elettrone (o positrone) emesso dal decadimento del muone all'interno di una delle lastre di alluminio osservato in una sola delle slab interne, attraverso l'OR esclusivo:

$$STOP = (S2 \overset{\circ}{\vee} S3 \overset{\circ}{\vee} S4) \wedge \overline{(S1 \vee S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)}$$

La condizione di *scatola chiusa* (ovvero che non ci siano eventi nelle slab superiore o inferiore o in quelle laterali) serve per evitare di selezionare segnale che provenga da eventi esterni.

PMT	Tensione [V]
1	1880
2	1960
3	1930
4	1925
5	1870
6	1960
7	1780
8	1870
9	1670
10	1810
11	1720
12	1850
13	1940
14	1780

Tabella 30: Regolazione delle tensioni per ciascun PMT.

In Tabella 30 sono riportate le tensioni impostate per ogni fotomoltiplicatore mentre in Tabella 31 sono riportati i circuiti logici studiati e le relative frequenze. Come atteso le frequenze

registerate una volta posizionato lo strato di piombo sono in generale minori delle precedenti. Considerando le singole *slab*, inoltre, mentre risulta evidente l'andamento decrescente delle frequenze misurate senza lo strato di piombo, non lo è altrettanto quello per le frequenze con il piombo; ciò può essere spiegato considerando che nelle prime misure il ruolo svolto dalle slab superiori è simile a quello svolto dal piombo.

Si è osservata inoltre una grossa differenza tra l'uso del segnale negato e l'uso del voto per i moduli di coincidenza. Si consideri per esempio il circuito $S1 \wedge (S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)$: già in laboratorio si è riscontrata una grossa differenza fra le due frequenze e si è subito notato che la somma della frequenza registrata per il circuito $S1 \wedge (S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)$ con l'uscita barrata e della frequenza registrata per il circuito $S1 \wedge (S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)$ supera la frequenza di $S1$; ciò ha suggerito che le frequenze misurate attraverso l'utilizzo dell'uscita barrata fossero sbagliate. Questa ipotesi è stata verificata attraverso delle prove di conteggio per i circuiti $PMT1 \wedge \overline{PMT1}$ e $PMT1 \wedge PMT1$ (*veto*). Si è osservato per entrambi un rate di conteggio pari a zero (come ci si aspetta dalla coincidenza tra un qualsiasi segnale e la sua negazione). E' stato quindi introdotto un ritardo nel segnale negato e si è osservato che mentre il secondo circuito (*veto*) continuava a non trovare coincidenze, il circuito che utilizzava l'uscita barrata aveva una frequenza diversa da zero: è stato quindi deciso di utilizzare il voto al posto del segnale negato per i circuiti successivi. Tuttavia una successiva osservazione dei dati raccolti in questa fase dell'esperienza ha evidenziato il fatto che anche alcune frequenze misurate attraverso il voto siano poco realistiche: per esempio i conteggi di *start* e di *stop* superano quanto atteso. Questo errore è stato causato da una disattenzione sul controllo del ritardo di ogni singolo segnale, che ha portato ad una misura errata dei conteggi. Per l'ultima fase dell'esperienza, prima dell'acquisizione dello spettro finale, è stato pertanto necessario ricontrillare con attenzione sull'oscilloscopio tutti i segnali e le logiche costruite, in modo tale da avere delle frequenze sensate almeno per i segnali di *start* e di *stop*, fondamentali per ottenere dei buoni dati per lo spettro.

Circuito logico	Freq. senza Piombo [Hz]	Freq. con Piombo [Hz]
$S1(PMT1 \wedge PMT2)$	80.19 ± 0.90	62.99 ± 0.46
$S2(PMT9 \wedge PMT10)$	78.52 ± 0.89	72.71 ± 0.49
$S3(PMT7 \wedge PMT8)$	74.58 ± 0.86	67.37 ± 0.47
$S4(PMT5 \wedge PMT6)$	73.80 ± 0.86	71.17 ± 0.49
$S5(PMT3 \wedge PMT4)$	70.25 ± 0.84	68.52 ± 0.48
$PMT11$	137.18 ± 1.17	127.85 ± 0.65
$PMT12$	130.82 ± 1.14	97.39 ± 0.57
$PMT13$	124.59 ± 1.12	113.94 ± 0.62
$PMT14$	122.28 ± 1.11	101.86 ± 0.58
$S1 \wedge S2$	39.20 ± 0.36	35.27 ± 0.34
$S1 \wedge S2 \wedge S3$	29.69 ± 0.31	27.28 ± 0.30
$S1 \wedge S2 \wedge S3 \wedge S4$	23.29 ± 0.28	20.65 ± 0.26
$S1 \wedge S2 \wedge S3 \wedge S4 \wedge S5$	14.17 ± 0.22	16.51 ± 0.23
$S1 \wedge (S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)$	75.50 ± 0.50	56.54 ± 0.43
$S1 \wedge \overline{(S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)}(\text{veto})$	43.24 ± 0.38	37.15 ± 0.35
$S1 \wedge (S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)$	41.80 ± 0.37	37.67 ± 0.35
$S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14$	517.58 ± 1.31	451.98 ± 1.23
$\overline{S1} \wedge (11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)(\text{veto})$	526.17 ± 1.32	471.30 ± 1.25
$\overline{S1} \wedge S2 \wedge S3 \wedge S4 \wedge S5(\text{veto})$	4.36 ± 0.12	4.15 ± 0.12
$11 \vee 12 \vee 13 \vee 14$	463.41 ± 1.24	411.61 ± 1.17
$S1 \wedge (11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)$	25.07 ± 0.29	22.79 ± 0.28
$\overline{S1} \wedge S2 \wedge S3 \wedge S4 \wedge S5$	21.95 ± 0.27	
$S2 \vee S3 \vee S4$	151.67 ± 0.71	137.77 ± 0.68
$S2 \overset{\circ}{\vee} S3 \overset{\circ}{\vee} S4$	81.56 ± 0.52	71.93 ± 0.49
$(S2 \vee S3 \vee S4) \wedge \overline{(S1 \vee S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \wedge 14)}(\text{veto})$	81.09 ± 0.52	71.24 ± 0.49
$(S2 \overset{\circ}{\vee} S3 \overset{\circ}{\vee} S4) \wedge \overline{(S1 \vee S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)}(\text{veto})$	57.47 ± 0.44	48.28 ± 0.40

Tabella 31: Frequenze dei circuiti logici creati: è indicato l'uso del voto per i segnali negati, in caso contrario è stata utilizzata l'uscita barrata.

5 Test di linearità

Per effettuare la calibrazione degli spettri aquisiti successivamente è stato prima necessario verificare separatamente la linearità dell'ADC e del THPC e successivamente della catena composta dai due moduli.

5.1 Linearità dell'ADC

Per la verifica della linearità dell'ADC è stata utilizzata un'onda quadra proveniente da un generatore di funzioni la cui ampiezza è stata variata da $0.1V$ a $1V$ con step di $0.1V$ e successivamente da $1V$ fino ad arrivare verso il fondoscallo dello strumento ($4.52V$) con step di $0.5V$. L'ADC è stato collegato al PC che tramite l'utilizzo del software SpectLab digitalizza il segnale in 4096 canali. In base al valore della tensione impostato si osserva un picco in una determinata posizione dello spettro; fittando tale picco con una gaussiana è stato ottenuto il valore del canale corrispondente al centroide della curva. Prima di procedere con l'acquisizione degli spettri è stato verificato che la posizione del centroide non variasse con la frequenza, facendo alcune prove tra i $100Hz$ e i $100kHz$. I dati riportati in Tabella 32 sono stati acquisiti ad una frequenza di $10 kHz$ e per un tempo di $10 s$, ottenendo così un adeguato numero di dati per ogni acquisizione.

Tensione(V)	Centroide	Sigma centroide
0.100 ± 0.002	71.9	0.5
0.200 ± 0.005	147.9	0.5
0.300 ± 0.007	226.0	0.6
0.400 ± 0.009	304.2	0.7
0.500 ± 0.012	389.6	0.7
0.600 ± 0.013	468.4	0.7
0.700 ± 0.015	547.5	0.7
0.800 ± 0.020	629.5	0.6
0.904 ± 0.022	714.3	0.6
1.000 ± 0.023	786.4	0.6
1.500 ± 0.042	1191.3	0.5
2.000 ± 0.050	1594.8	0.5
2.500 ± 0.058	1978.0	0.6
3.000 ± 0.067	2355.2	0.7
3.500 ± 0.076	2732.6	1.0
4.000 ± 0.085	3110.8	1.3
4.52 ± 0.11	3536.0	1.7

Tabella 32: *Test di linearità dell'ADC*

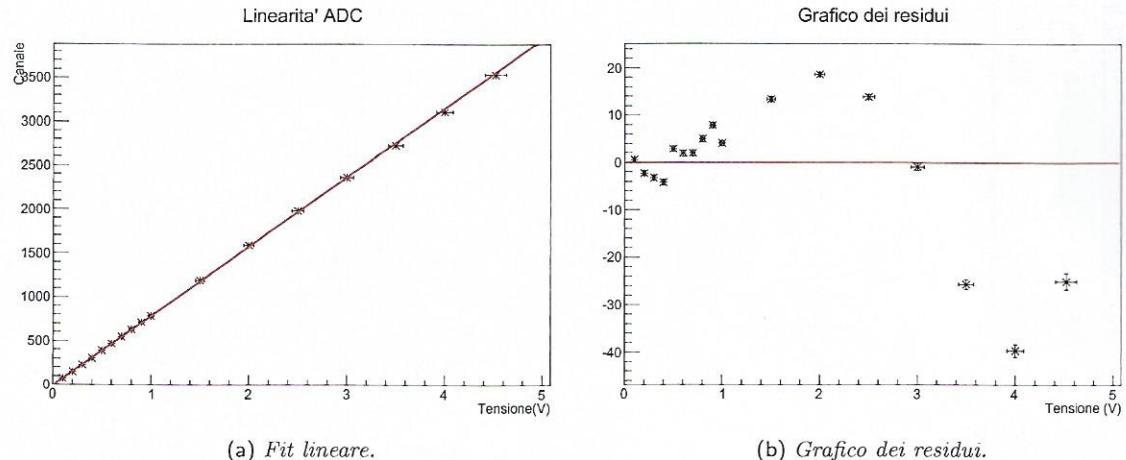


Figura 19: *Test di linearità dell'ADC*.

Risultati del fit:

pendenza : $789.5 \pm 5.6 \text{ ch/V}$ (0.7%)

intercetta : $-7.6 \pm 1.7 \text{ ch}$ (22%)

χ^2 ridotto : 0.18

Osservando la Figura 19 e i risultati ottenuti dal fit possiamo notare come la linearità del modulo sia ben verificata.

5.2 Linearità del THPC

Per la verifica della linearità del THPC è stato utilizzato come START il segnale proveniente da uno dei fototubi (opportunamente discriminato) e come STOP il segnale proveniente dallo stesso fototubo a cui è stato applicato un ritardo che varia da $1\mu\text{s}$ a $10\mu\text{s}$ con uno step di $1\mu\text{s}$, da $10\mu\text{s}$ a $20\mu\text{s}$ con uno step di $2\mu\text{s}$ più due ritardi al di sotto del microsecondo. La scelta di questo intervallo ($0 - 20\mu\text{s}$) è in accordo con il tempo previsto per il decadimento del muone ($\sim 2\mu\text{s}$). L'uscita del segnale in tensione è stata letta direttamente all'oscilloscopio.

Tempo (μs)	Tensione (V)
0.499 ± 0.012	0.258 ± 0.006
0.701 ± 0.012	0.324 ± 0.009
0.999 ± 0.024	0.386 ± 0.010
1.998 ± 0.048	0.624 ± 0.014
2.999 ± 0.048	0.844 ± 0.018
3.999 ± 0.048	1.070 ± 0.025
4.999 ± 0.048	1.280 ± 0.028
6.00 ± 0.12	1.500 ± 0.032
7.00 ± 0.12	1.730 ± 0.046
8.00 ± 0.12	1.960 ± 0.049
9.00 ± 0.12	2.190 ± 0.053
10.00 ± 0.12	2.380 ± 0.056
12.00 ± 0.12	2.820 ± 0.064
13.99 ± 0.12	3.260 ± 0.072
15.96 ± 0.24	3.680 ± 0.080
18.01 ± 0.24	4.140 ± 0.088
20.01 ± 0.24	4.580 ± 0.109

Tabella 33: *Test di linearità del THPC.*

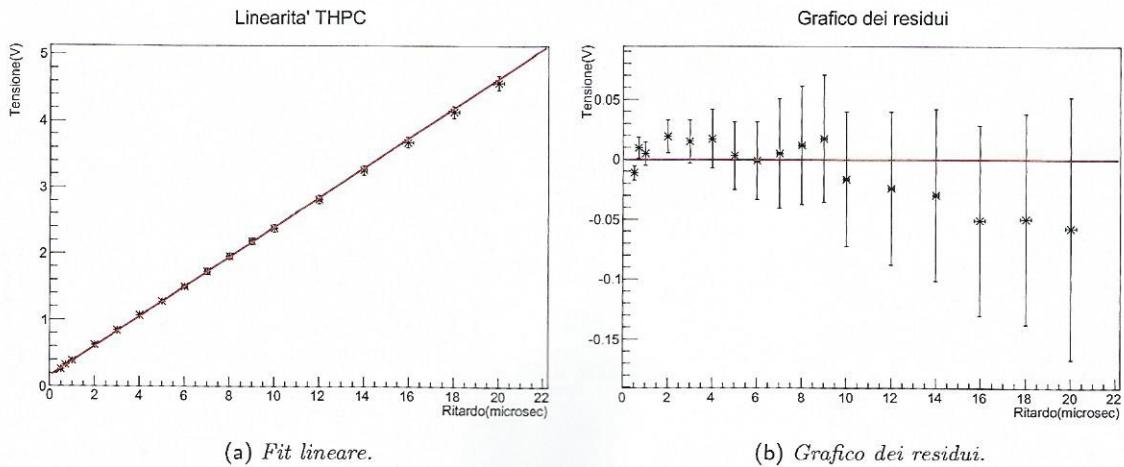


Figura 20: *Test di linearità del THPC.*

Risultati del fit:

pendenza : $0.224 \pm 0.002 V/\mu s$ (0.9%)

intercetta : $0.157 \pm 0.005 V$ (3%)

χ^2 ridotto : 0.50

Anche in questo caso possiamo vedere come i dati si dispongano bene lungo la retta interpolante e come i residui si dispongano in modo omogeneo al di sopra e al di sotto dello zero intersecando, con la relativa barra d'errore, tale valore.

5.3 Linearità della catena THPC+ADC

Il segnale mandato in ingresso al THPC è dato, come in precedenza, dal segnale di un fototubo come START e dallo stesso segnale ritardato come STOP. L'uscita dal THPC è stata quindi inviata all'ADC, collegato al PC che digitalizza il segnale tramite il programma SpectLab. I dati presenti in Tabella 34 corrispondono ad una acquisizione di 30s.

Tempo(μs)	Canale centroide	Sigma centroide
0.499 ± 0.012	226.8	0.4
0.701 ± 0.012	263.3	0.5
0.999 ± 0.024	315.9	0.5
1.998 ± 0.048	494.1	0.5
2.999 ± 0.048	674.7	0.5
3.999 ± 0.048	852.3	0.5
4.999 ± 0.048	1034.6	0.5
6.00 ± 0.12	1214.9	0.5
7.00 ± 0.12	1394.2	0.5
8.00 ± 0.12	1574.1	0.5
9.00 ± 0.12	1757.4	0.6
10.00 ± 0.12	1934.8	0.6
12.00 ± 0.12	2266.0	0.7
13.99 ± 0.12	2629.6	0.7
15.96 ± 0.24	2990.0	0.6
18.01 ± 0.24	3347.1	0.7
20.01 ± 0.24	3721.5	0.6

Tabella 34: Test di linearità della catena ADC+THPC

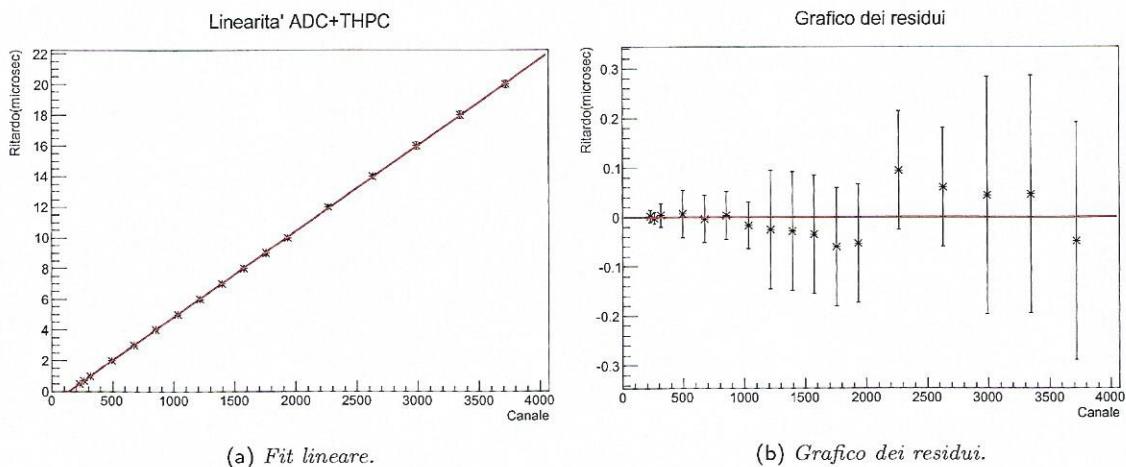


Figura 21: Test di linearità della catena ADC+THPC

Risultati del fit:

pendenza : $(5.59 \pm 0.02) \cdot 10^{-3} \text{ mus}/\text{ch}$ (0.4%)

intercetta : $-7.7 \pm 1.1 \mu\text{s}$ (14%)

χ^2 ridotto : 0.12

Si possono considerare verificate, quindi, sia le linearità dei due moduli separati che la linearità della catena THPC+ADC. Quest'ultima calibrazione verrà utilizzata per calibrare gli spettri acquisiti successivamente.

6 Analisi del primo spettro

6.1 Circuiti logici

Prima di descrivere l'analisi dello spettro acquisito riportiamo alcune modifiche rispetto al lavoro precedente, effettuate appena prima di far partire l'acquisizione dello stesso, in modo tale da porsi in condizioni migliori per ottenere buoni dati. Innanzitutto sono state reimpostate le tensioni di lavoro dei fotomoltiplicatori in modo che il numero di conteggi risultasse decrescente dalla slab più alta alla più bassa (si faccia riferimento alla Tabella 35).

PMT	Tensione [V]	Slab	Frequenza [Hz]
1	1881	S1	64.8 ± 0.8
2	1961		
9	1670	S2	64.8 ± 0.8
10	1811		
7	1782	S3	62.0 ± 0.8
8	1872		
5	1866	S4	59.7 ± 0.8
6	1945		
3	1930	S5	59.5 ± 0.7
4	1926		
11	1730		95.6 ± 0.9
12	1850		106.1 ± 1.0
13	1948		105.4 ± 1.0
14	1785		96.2 ± 1.0

Tabella 35: Regolazione finale delle tensioni per ciascun PMT e frequenze registrate.

Inoltre, a seguito dei problemi sorti con l'utilizzo del segnale negato e del voto descritti precedentemente, sono stati rivisti i due circuiti logici di interesse, fondamentali per effettuare una buona misura, lo **START** e lo **STOP**. In particolare sono stati ricontrollati e settati opportunamente i ritardi e le larghezze dei segnali.

Mentre il circuito di **STOP** è stato mantenuto invariato rispetto a quello testato precedentemente (dove la negazione dei segnali è stata ottenuta tramite l'utilizzo del voto e non tramite l'uscita barrata)

$$STOP = (S2 \overset{\circ}{\vee} S3 \overset{\circ}{\vee} S4) \wedge \overline{(S1 \vee S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)}$$

per il circuito di **START** si è deciso invece di introdurre la seguente modifica

$$START = (S1 \wedge S2) \wedge \overline{(S5 \vee 11 \vee 12 \vee 13 \vee 14)}$$

utilizzando anche in questo caso il voto. Con questa modifica si è deciso quindi di considerare come eventi buoni quelli che attraversano le prime due slab e non solamente la prima, in modo da rendere più efficiente il conteggio corrispondente all'entrata del muone. In Tabella 36 sono riportate le frequenze finali ottenute.

Circuito	Frequenza [Hz]
START	5.87 ± 0.14
STOP	34.7 ± 0.3

Tabella 36: Frequenze finali per i circuiti di START e di STOP ottenute da un'acquisizione di 300s

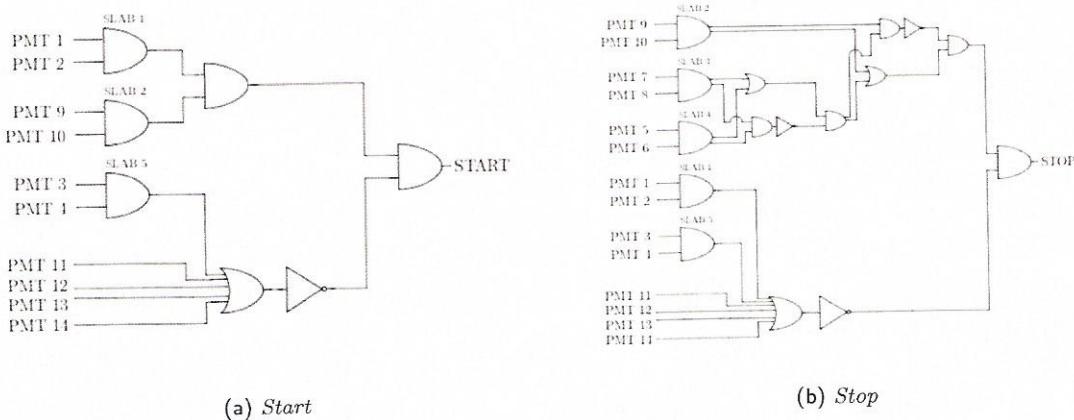


Figura 22: Schemi logici dei circuiti di start e di stop utilizzati per l'acquisizione dello spettro finale.

6.2 Analisi del fondo

Stabilite definitivamente le logiche di **START** e di **STOP**, si è analizzata la distibuzione delle coincidenze casuali. Si sono effettuate due diverse misure, la prima fornendo il segnale di **START** fisico e un segnale di **STOP** artificiale, mentre per la seconda si è utilizzato lo **STOP** fisico e lo **START** artificiale.

Il segnale artificiale è stato ottenuto tramite un generatore di funzioni producendo una sequenza di impulsi simili a quelli in uscita dai discriminatori, dunque con una larghezza di 80ns e un'ampiezza di $-800mV$.

Inizialmente sono stati acquisiti due spettri a frequenze diverse per ognuna delle configurazioni, a 2kHz e a 10kHz, in modo tale da verificare che lo spettro non dipenda dalla frequenza dell'impulsatore. Dall'osservazione dei quattro grafici ottenuti (ne riportiamo solo uno esemplificativo in Figura 23) si nota la presenza di un picco nella zona iniziale, contrariamente a quanto atteso, ovvero uno spettro uniforme su tutti i canali. Dopo aver effettuato opportuni controlli in laboratorio, è stato verificato un malfunzionamento del modulo THPC utilizzato. Si è quindi provveduto alla sostituzione di quest'ultimo e sono state effettuate delle prove rapide che hanno confermato il corretto funzionamento del nuovo modulo³. Con questo nuovo modulo sono stati acquisiti due spettri di fondo nelle due diverse configurazioni, all'unica frequenza di 10kHz per l'impulsatore. La misura è stata effettuata per un tempo più lungo rispetto alle precedenti (circa 24 ore), per verificare che il picco non fosse semplicemente più attenuato rispetto a prima. Come si può notare dalla Figura 24 non si osservano irregolarità.

³Le calibrazioni riportate nelle sezioni precedenti relative alla linearità del THPC si riferiscono tutte a quest'ultimo modulo, dal momento che è quello che verrà poi utilizzato per acquisire il primo spettro. Abbiamo ritenuto superfluo riportare, nella sezione precedente, le calibrazioni ottenute dal modulo difettoso.

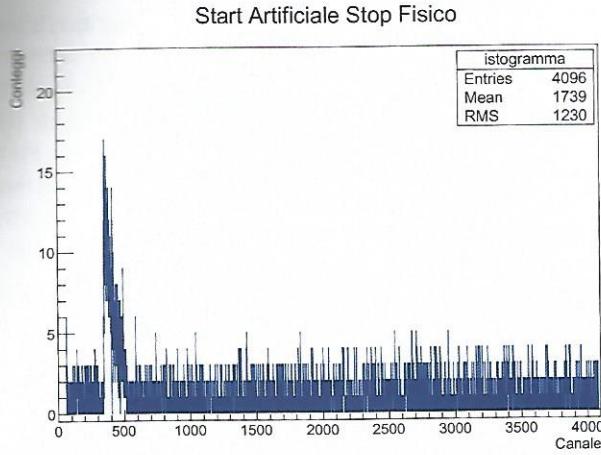
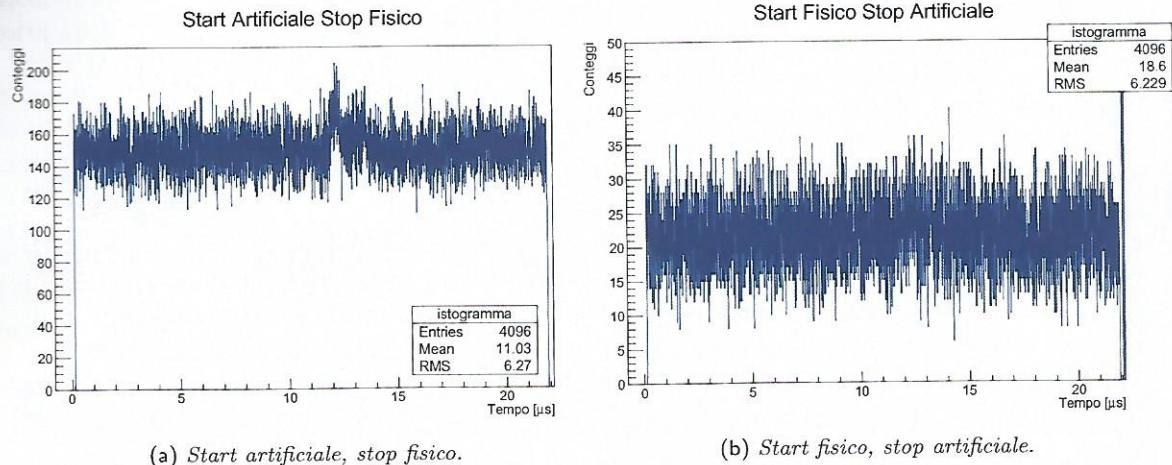


Figura 23: Esempio di acquisizione con il primo modulo: si nota la presenza di un picco poco prima del canale 500. (Non è stata effettuata la calibrazione da Canale a Ritardo in quanto il modulo è stato sostituito e questa calibrazione sarebbe stata di poco interesse)



(a) *Start artificiale, stop fisico.*

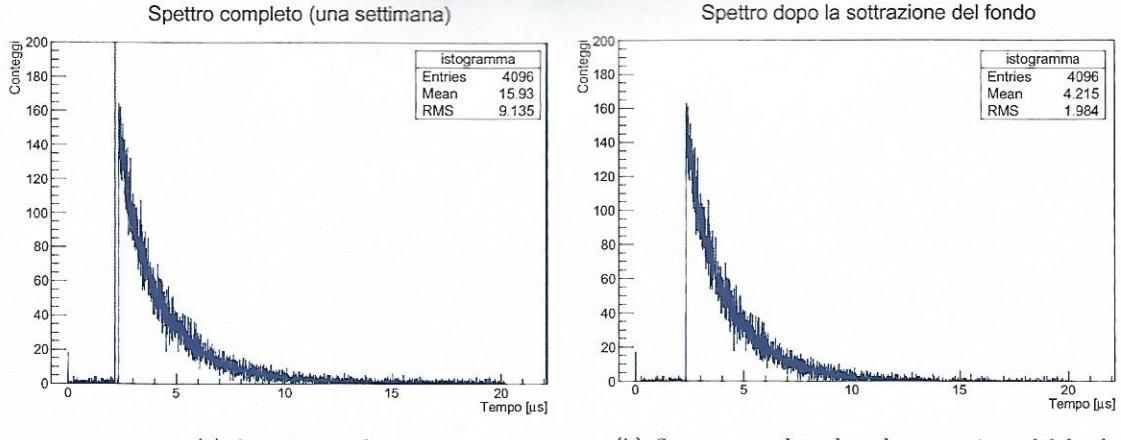
(b) *Start fisico, stop artificiale.*

Figura 24: Spettri di fondo: gli spettri sono stati acquisiti con l'impulsatore a 10 kHz, per la durata di 24 ore.

6.3 Analisi dello spettro

Al fine di ottenere uno spettro ad elevata statistica è stata effettuata una misura lunga, di circa una settimana. Il segnale di **START** è dato dal circuito logico discusso in precedenza, mentre il segnale di **STOP** viene ritardato di $2\mu s$. Da una prima osservazione dello spettro in Figura 25 si notano, oltre all'andamento esponenziale previsto, che parte a un tempo $\tau^* = 2.34 \mu s$, due picchi molto accentuati, uno nella prima parte dello spettro e uno negli ultimi canali, che corrispondono a eventi non fisici; si è ipotizzato fossero causati da effetti dell'elettronica. In particolare il secondo è causato dall'attivarsi dello *start* del THPC, che non è seguito da un evento di *stop* entro il range impostato: una volta conclusa la rampa di tensione il TAC si resetta impostando un evento nell'ultimo canale.

Prima di procedere con l'analisi vera e propria dello spettro, sono stati eliminati i picchi discussi precedentemente ed è stato stimato e sottratto il fondo. Si è deciso di considerare come eventi di fondo quelli con un tempo superiore a quattro volte la vita media del muone più longevo. Facendo una media degli eventi compresi fra $t^* + 4\tau^+ = 11.13 \mu s$ e $20 \mu s$ si è quindi stimato un valore medio di background pari a 1.22 ± 0.04 che si è sottratto ad ogni canale dello spettro completo.



(a) *Spettro completo.*

(b) *Spettro completo dopo la sottrazione del fondo.*

Figura 25: *Spettro ottenuto dopo una settimana di acquisizione: nel secondo grafico è stata effettuata la sottrazione del fondo e dei picchi senza un particolare significato fisico.*

Lo spettro che si ottiene dopo questa operazione di sottrazione del fondo corrisponde alla sovrapposizione di due esponenziali, relativi ai decadimenti del μ^+ e del μ^- . Per stimare le due vite medie è necessario isolare i due esponenziali, in particolare ci si aspetta che nella prima parte dello spettro entrambi i contributi siano significativi, ma dopo un tempo pari a $4\tau^-$ il contributo dei μ^- sarà trascurabile rispetto a quello dei μ^+ . Dunque in un intervallo di tempo che va da $t^* + 4\tau^- = 5.86 \mu s$ a $t^* + 4\tau^+ = 11.13 \mu s$ (tempo oltre il quale il contributo dei μ^+ non è predominante rispetto al fondo) la curva è descritta dall'esponenziale:

$$N^+(t) = N^+(0) \exp \left(-\frac{t - t^*}{\tau^+} \right)$$

Per stimare τ^+ è stato linearizzato lo spettro, graficando il logaritmo del numero di eventi in funzione del tempo, ed è stato effettuato un fit lineare. Linearizzando l'equazione precedente otteniamo

$$\ln(N^+(t)) = \ln(N^+(0)) - \frac{t}{\tau^+} + \frac{t^*}{\tau^+}$$

Dunque è possibile fittare lo spettro in scala logaritmica con una funzione del tipo $f(t) = mt + q$, dove la pendenza m corrisponde, a meno del segno, all'inverso della vita media del μ^+ (si faccia riferimento alla Tabella 37).

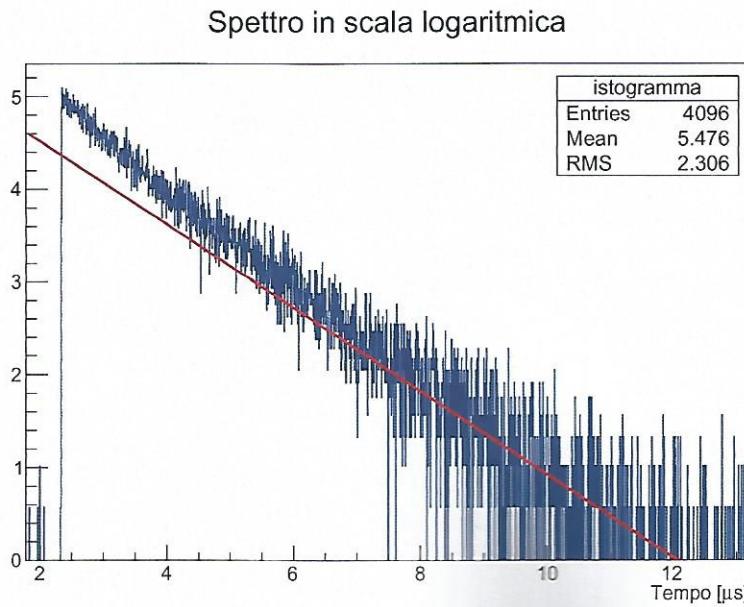


Figura 26: *Spettro in scala logaritmica.*

Una volta stimato τ^+ è possibile concludere l'analisi dati stimando infine il tempo di vita media dei μ^- . Consideriamo infatti la regione dello spettro in cui entrambi i contributi sono significativi, ovvero quella compresa tra t^* e $t^* + 4\tau^-$: è ora possibile ottenere lo spettro dei μ^- sottraendo allo spettro completo una curva esponenziale ottenuta dalla formula precedentemente scritta i cui parametri si estrapolano da quelli del fit lineare. A questo punto prendendo nuovamente il logaritmo dello spettro così ottenuto per sottrazione ed effettuando un nuovo fit lineare è possibile dare una stima del tempo di vita media del μ^- usando un'espressione analoga per la retta interpolante, i cui parametri si possono trovare sempre in Tabella 37.

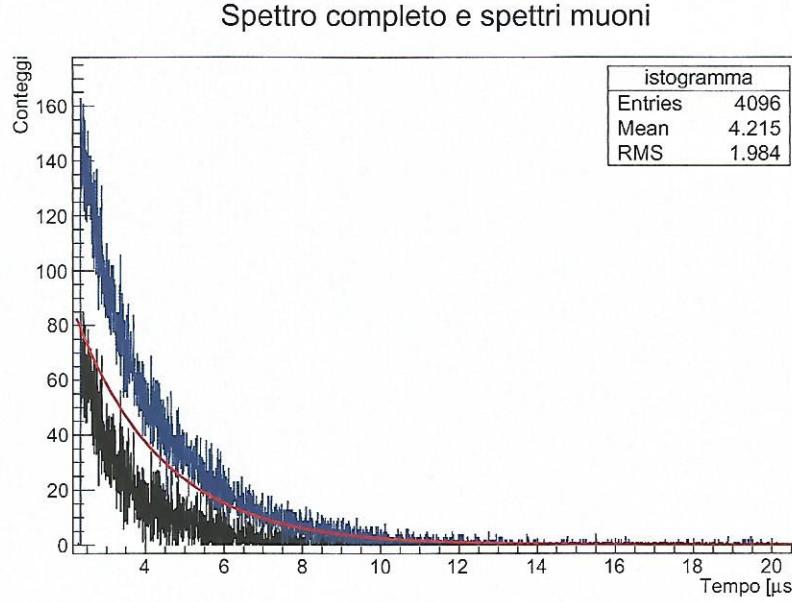


Figura 27: Spettri dei muoni a confronto: spettro completo in blu, spettro dei μ^+ rappresentato dall'esponenziale in rosso, spettro dei μ^- (ottenuto per sottrazione).

L'ultima grandezza stimata è il rapporto tra il numero dei μ^+ e dei μ^- al tempo iniziale t^* , ovvero $R = \frac{N(t^*)^+}{N(t^*)^-}$. Poichè, come già descritto in precedenza, dai valori del fit lineare si possono ricavare facilmente le corrispondenti interpolazioni esponenziali, si possono calcolare i valori $N(t^*)^+$ e $N(t^*)^-$, il cui errore può essere calcolato per propagazione a partire dagli errori su m e q . Si è quindi ottenuto un valore di R pari a $R = 1.97 \pm 0.46$.

	Intercetta	Pendenza [μs^{-1}]	χ^2 ridotto	$\tau [\mu s]$
Retta +	5.42 ± 0.27	-0.449 ± 0.030	0.13	2.23 ± 0.13
Retta -	6.74 ± 0.26	-1.082 ± 0.053	0.39	0.92 ± 0.05

Tabella 37: Risultati dei fit lineari

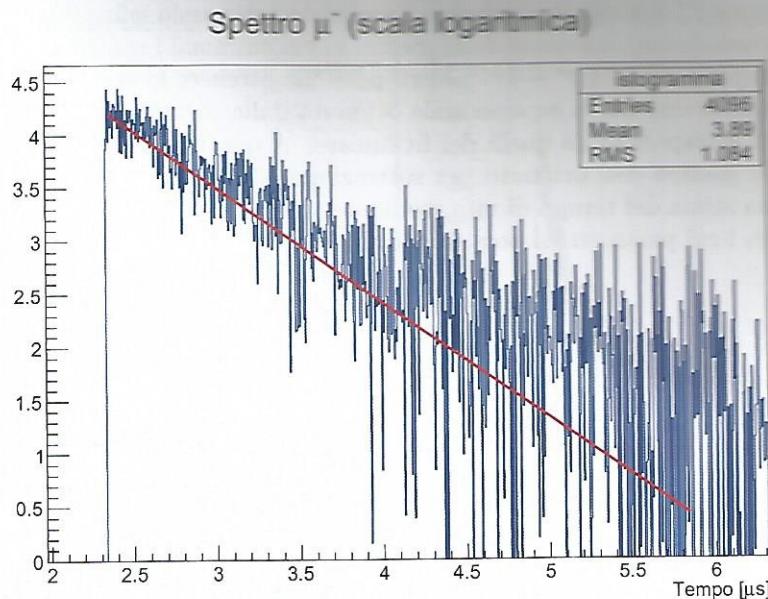


Figura 28: Spettro dei μ^- in scala logaritmica.

Si è effettuato un confronto dei risultati ottenuti con i dati presenti in letteratura⁴, riportiamo in tabella i valori e le relative e le compatibilità: come si può vedere le stime ricavate sono in discreto accordo con quanto atteso.

	Valore teorico	Valore sperimentale	Compatibilità
τ^+	$2.1969803 \pm 0.0000021\mu s$	$2.23 \pm 0.13\mu s$	0.25
τ^-	$0.88 \pm 0.01\mu s$	$0.92 \pm 0.05\mu s$	0.78
R	1.261 ± 0.009	1.97 ± 0.46	1.5

Tabella 38: Confronto dei valori sperimentali con la letteratura

⁴Per il valore di R si faccia riferimento a *Measurement of cosmic-ray muon charge ratio at sea level between energies of 10 and 1500 GeV*, PhysRevLett.30.937

Riferimenti bibliografici

- [1] Alessandro Bettini, *Introduction to elementary particle physics*, 2008.
- [2] Stefaan Tavernier, *Experimental techniques in nuclear and particle physics*, 2010.
- [3] Glenn F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 2010.
- [4] T. W. Crane and M. P. Baker, *Neutron detectors*.
- [5] J. C. Sens, *Capture of negative muons by nuclei*, 1958, PhysRev.113.679.
- [6] T. Suzuki et. al., *Total nuclear capture for negative muons*, 1986, Physical Review C.
- [7] T. H. Burnett et al., *Measurement of cosmic-ray muon charge ratio at sea level between energies of 10 and 1500 GeV*, 1973, PhysRevLett.30.937.